ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН







Проектирование электрических машин

Учебник

Под редакцией профессора **И. П. Копылова**

4-е издание, исправленное и дополненное

2005

УДК 621.313
ББК 31.261

Копылов Игорь Петрович, Клоков Борис Константинович,
Морозкин Виктор Павлович, Токарев Борис Федорович.

Проектирование электрических машин: учебник для вузов / под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., исправленн. и доп. – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.

Рассмотрены электромагнитные, тепловые, вентиляционные и механические расчеты асинхронных, синхронных машин и машин постоянного тока. Приведены примеры расчетов электрических машин новых серий. Даны необходимые справочные материалы для выполнения курсовых и дипломных проектов.

В четвертом издании (3-е — 2002 г.) приведены материалы по новым сериям электродвигателей.

Для студентов электротехнических и энергетических специальностей. Учебник может быть полезен инженерам, специализирующимся в области проектирования и эксплуатации электрических машин.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Без преувеличения можно считать, что в XX. в. электричество совершило техническую революцию в промышленности. Почти вся электроэнергия вырабатывается электрогенераторами, две трети которой преобразуется электродвигателями в механическую энергию. Поэтому электромеханики могут гордиться тем, что их детище — электрические машины являются главными движущими силами технического прогресса.

Проектирование электрических машин требует глубоких, профессиональных знаний не только в электромеханике, но и в теплофизике, механике и экономике. Данный учебник написан для студентов-электромехаников, изучающих курс «Проектирование электрических машин», а также для студентов других специализаций, выполняющих курсовой проект по электрическим машин. В первых восьми главах излагается лекционный материал, а в последующих — необходимый для выполнения курсовых проектов по асинхронным, синхронным машинам и машинам постоянного тока.

В книге нет материалов по специальным электрическим машинам, турбо- и гидрогенераторам.

Учебник написан сотрудниками кафедры «Электромеханики» Московского энергетического института (ТУ). К сожалению, из авторов второго издания учебника в живых остался только один, и ему пришлось весь труд по переизданию принять на свои плечи и постараться в тексте сохранить индивидуальные особенности своих коллег.

Учебник предназначен для студентов, но может быть полезен инженерам-электромеханикам в практической работе.

Двигатели серии АИР соответствовали нормам СЭВ, отличным от требований Европейского комитета по координации электротехнических стандартов (SENELEC) и стандартов ФРГ (DIN). До последнего времени на электротехнических заводов России выпускались в основном асинхронные двигатели серий 4А и АИР.

В настоящее время Владимирский электромоторный завод (ВЭМЗ) освоил выпуск серии 5А, заменивший серию АИ. В серии 5А сохранена конструктивная и технологическая преемственность серии АИ.

Ярославский электромашиностроительный завод (ЯЭМЗ) освоил производство серии RA (Российская асинхронная) с высотой оси вращения 71…280 мм.

Более подробные данные о сериях RA и 5А приведены в разделе «Проектирование асинхронных машин».

Автор благодарит рецензента профессора кафедры «Электрических машин и аппаратов» Московского государственного университета О. Д. Гольдберга за ценные замечания.

Профессор Копылов И.П.

ВВЕДЕНИЕ

Электротехническая промышленность, несмотря на все трудности послеперестроичного периода, остается ведущей отраслью в государстве. Продукция используется во всех промышленных, сельскохозяйственных, военных и бытовых установках. Поэтому качество электротехнических изделий во многом определяет технический уровень продукции других отраслей.

Электрические машины в общем объеме производства электротехнической промышленности занимают основное место, поэтому их технико-экономические показатели и эксплуатационные свойства имеют важное значение для экономики нашей страны.

Проектирование электрических машин — это искусство, соединяющее знание процессов электромеханического преобразования энергии с опытом, накопленным поколениями инженеров-электромехаников, умение применять вычислительную технику и талантом инженера, создающего новую или улучшающего уже выпускаемую машину.

При создании электрической машины рассчитывают размеры статора и ротора, выбирают типы обмоток, обмоточные провода, изоляция, материалы активных и конструктивных частей машины. Отдельные части машины должны быть так сконструированы и рассчитаны, чтобы при ее изготовлении трудоемкость и расход материалов были наименьшими, а при эксплуатации машина обладала высокой надежностью и наилучшими энергетическими показателями, при этом электрическая машина должна соответствовать условиям применения ее в электроприводе.

При проектирование электрических машин необходимо учитывать соответствие их технико-экономических показателей современному уровню при соблюдении требований государственных и отраслевых стандартов, а также назначение и условие эксплуатации, стоимость активных и конструктивных материалов, КПД, технологию производства, надежность в работе и патентную чистоту. Расчет и конструирование электрических машин неотделимы от технологии их изготовления. Поэтому при проектировании необходимо учитывать возможности электротехнических заводов, стремиться к максимальному снижению трудоемкости изготовления электрических машин.

Электрические машины массового производства выпускают едиными сериями. Только асинхронных двигателей единых серий изготовляют несколько миллионов штук в год.

Серии электрических машин сменялись в течение 7—12 лет. Проектирование новых серий — ответственная задача, решаемая с учетом новейших мировых достижений ведущих электротехнических фирм. Это накладывает особые требования на проектирование базовых машин серий и их модификаций. При проектировании необходимо учитывать возможные изменения стоимости материалов и электроэнергии, спрос на международном рынке, затраты на технологическое оборудование и другие факторы.

После распада СССР в России осталась, примерно, половина мощности электротехнических заводов. В начале девяностых годов XX в. Целый ряд типоразмеров электрических машин в России не выпускался. Если раньше на одном заводе выпускались машины двух-трех высот оси вращения и была высокая автоматизация производства, то в последние годы электромашиностроительные заводы нашей страны освоили широкую номенклатуру машин и принимают заказы практически на любые машины, соответствующие возможностям производства.

Все это потребовало новых подходов к проектированию электрических машин — значительно сократить сроки предпроизводственной подготовки и несколько изменить технологию.

Критерий оптимизации электрических машин определяется, как правило, минимумом суммарных затрат, т.е. минимумом стоимости материалов, затрат на изготовление и эксплуатацию. Стоимость эксплуатации зависит от КПД, коэффициента мощности, качества машины, ремонтоспособности и ряда других факторов.

При проектировании индивидуальной машины или небольшой серии критерий оптимизации согласовывается с заказчиком.

Выбрать вариант производства электрической машины можно, сопоставив многие варианты расчета, поэтому без вычислительных машин не обходится ни одной серьезный расчет электрических машин. В настоящее время ЭВМ применяют для выполнения полного оптимизационного расчета электрической машины, ведутся работы по созданию системы автоматизированного проектирования электрических машин, которая должна не только выполнять расчет машины, но и выдавать рабочие чертежи. Предполагается, что в будущем автоматизированные системы проектирования будут выполнять работу от приема заказа на проектирование до испытания без ее изготовления (прогнозирование геометрии, надежности и характеристик).

Сопоставление программ расчетов, накопление банков данных, решение вопросов создания автоматизированной системы проектирования электрических машин — одни из трудовых и важных задач электротехнической науки. Но прежде чем заниматься этими вопросами, необходимо научиться проектировать машину. Для этого надо уметь

проводить электромагнитный, тепловой, механический и экономический расчет машины.

Данный учебник научит рассчитывать электрическую машину, применяя традиционные средства вычислительной техники. В книге по каждому типу машин даны примеры расчета, которые можно выполнять с применением мини-ЭВМ.

Учебник не может охватить все данные, необходимые для расчета и конструирования электрической машины, поэтому предполагается, что читатель при выполнении проекта будет пользоваться справочниками, электротехническими журналами, каталогами и атласами чертежей.

Глава первая. **Общие вопросы проектирования электрических машин**

Электрические машины применяют во всех отраслях промышленности, в сельском хозяйстве и в быту. Их выпускают большими сериями и в индивидуальном исполнении. Во многих случаях электрические машины определяют технический уровень изделий, в которых они используются в качестве генераторов и двигателей. Проектирование электрических машин требует глубоких знаний и высокого профессионального мастерства.

1.1. ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Впервые электрические машины получили применение в промышленности более ста лет назад. Тогда же появились и первые рекомендации по их расчету. В конце XIX в. в Европе и Америке появились крупные электротехнические фирмы «Сименс», «Вестингауз», АЭГ и другие, на которых сложились крупные конструкторские и расчетные отделы. В это время начинают издаваться первые электротехнические журналы. В России журнал «Электричество» начал издаваться в 1880 г.

В России первые электротехнические заводы появились в начале XX в. Это «Электросила» в С.-Петербурге, «Динамо» в Москве и заводы в Харькове и Таллине. В годы первых пятилеток Москва, Ленинград и Харьков превратились в крупные производственные центры электропромышленности. После Великой Отечественной войны электротехническая промышленность развивалась бурными темпами, и в настоящее время крупные центры электромашиностроения есть в десятках городов СНГ. Около пятидесяти кафедр высших учебных заведений выпускают специалистов по электрическим машинам.

Первые фундаментальные работы по расчетам и проектированию электрических машин появились в конце десятых — начале двадцатых годов XX в. Это были книги Э. Арнольд, М. Видмара, А. Ла-Кура, Р. Рихтера, К.И. Шенфера, В.С. Кулебакина и др. [5].

Первыми отечественными трудами по проектированию были книги А.Я. Бергера, П.П. Копняева, В.А. Пантелеева и Ф.И. Холуянова. Большой вклад в проектирование электрических машин внесли работы ученых А.Е. Алексеева, Б.П. Апарова, А.И. Вольдека, В.Т. Касьянова, М.П. Костенко, Б.И. Кузнецова, Р.А. Лютера, Г.Н. Петрова, И.М. Постникова, П.С. Сергеева, Т.Г. Сорокера, В.А. Трапезникова и др. [5].

Проектирование электрической машины — сложная многовариантная задача. При ее решении приходится учитывать большое количество факторов. Единственным стремлением всех, кто проектирует машину, является получение, по возможности наиболее быстрым путем, более близкого к заданию расчетного варианта. Поэтому методики, подход к расчету и проектированию электрических машин на всех этапах развития включали все новейшие достижения в теории и практике электромашиностроения.

Большинство расчетных методик исходит из так называемой «машинной постоянной», определяемой из допустимых электромагнитных нагрузок.

Машинная постоянная Арнольда записывается в виде:

$$C_A = \frac{D^2 l_\delta \Omega}{P'} = \frac{2}{\pi a_\delta k_B k_{об} A B_\delta}, \qquad (1.1)$$

где D — диаметр якоря машины постоянного тока или внутренний диаметр статора, м; l_δ — расчетная длина магнитопровода, м; Ω — угловая скорость, рад/с; P' — расчетная мощность, ВА; A — линейная нагрузка, А/м; $\hat{A}_\delta$ — индукция в воздушном зазоре, Тл; $\grave{a}_\delta$ — коэффициент полюсного перекрытия; k_B — коэффициент формы кривой индукции, учитывающий изменение напряжения на выводах машины при холостом ходе и нагрузке; $k_{оá}$ — обмоточный коэффициент.

Определив $C_A = f(P')$ для различных типов электрических машин, можно получить базу для их расчетов. Машинная постоянная не является константой и зависит от электромагнитных нагрузок, напряжения, типа изоляции, системы охлаждения, стоимости материалов, надежности работы машины, суммы капитальных и эксплуатационных затрат и других факторов.

Ученые в разное время по-своему интерпретировали машинную постоянную. Эссон в конце 20-х годах XX в. предложил при проектировании применять коэффициент использования машины — момент на единицу объема, по существу, величину, обратную постоянной Арнольда.

Машинная постоянная Рихтера есть момент, отнесенный к единице поверхности якоря. В машинной постоянной Шенфера вместо внутреннего диаметра статора используется внешний диаметр.

В 1926 г. В.С. Кулебакин при выборе главных размеров синхронных машин учитывал токи короткого замыкания. В 1934 г. Б.П. Апаров для синхронных машин предложил при выборе главных размеров исходить из необходимой кратности пускового и максимального моментов.

Г.Н. Петров вводит понятия единичной машины и касательной силы, действующей на единицу поверхности ротора. Касательная сила зависит от мощности машины, но даже у самых крупных машин не превышает 0,03…0,04 МПа.

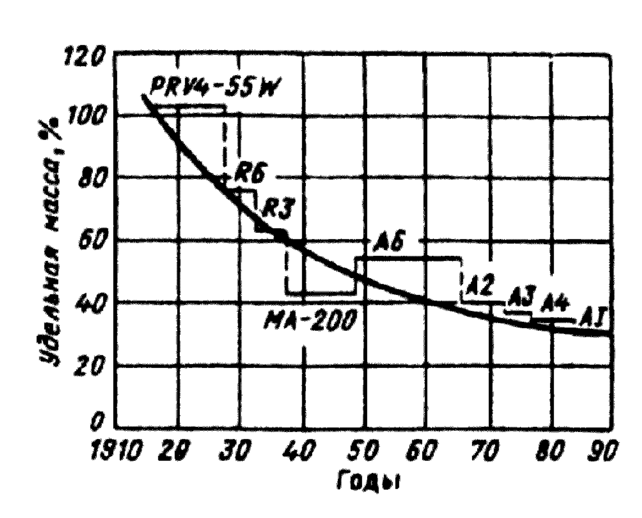


Рис. 1.1. Снижение массы асинхронных двигателей в XX в

Развитие теории электрических машин и широкое применение вычислительных машин изменяют подход к проектированию электрических машин. Наиболее общим показателем для различных типов электрических машин становится удельная мощность энергии магнитного поля, сконцентрированная в воздушном зазоре машины [6,15].

Масса на единицу мощности является одним из основных факторов, характеризующих технический уровень электрических машин. По сравнению с 1913 г. масса асинхронных двигателей современных серий снижена более чем в 3 раза (рис. 1.1). Наиболее значительное снижение массы было достигнуто в 1920...1950 гг. Предполагается, что в 2000...2001 гг. сокращение массы может составить не более 4—5%. В дальнейшем будет еще труднее обеспечить снижение массы при практически неизменном уровне энергетических показателей электрической машины. Даже небольшой процент сокращения расхода активных материалов потребует серьезных работ по усовершенствованию конструкции, технических свойств изоляционных и магнитных материалов. Снижение металлоемкости необходимо, так как выпуск машин единых серий постоянно увеличивается.

Удельный расход материалов в турбогенераторах с 1952 г. снизился более чем в 3 раза. Турбогенератор на 150 тыс. кВт с водородным охлаждением имел массу 350 т. Турбогенератор ТВВ-1200-2 имеет массу на единицу мощности, равную 0,457 кг/(кВ·А).

Значительный рост цен на медь приводит к повышению цены на обмоточные провода. Поэтому реальный становится проблема замены медных проводов на ферромагнитные (стальные) провода, имеющие активное сопротивление в десять раз больше, чем медные. Однако хорошие магнитные свойства и увеличение сечения проводов делают реальным замену медных обмоточных проводов на ферромагнитные при сохранении энергетических характеристик двигателей при некотором увеличении их габаритов.

Проектирование новых электрических машин со стальными обмотками потребуется сосредоточить усилия и талант многих коллективов инженеров-электромехаников. Вполне реальна замена меди в общепромышленных сериях электрических машин мощность до 5 кВт, так как в этом диапазоне мощности электротехническая промышленность потребляет свыше 50% меди [6].

Как следует из формулы (1.1), размеры машины зависят от индукции в воздушном B_δ и линейной нагрузки A.

При рассмотрении электрической машины как объекта разработки необходимо учитывать объем и длительность проектных, расчетных и технологических работ. Предпроизводственные работы включают изготовление рабочих чертежей, технологической оснастки и опытных образцов.

Этот этап требует достаточно много времени и больших коллективов конструкторов и технологов. Качество разработки проекта определяет судьбу электрической машины в производстве и эксплуатации.

Электрическая машина как объект производства должна иметь минимальную трудоемкость и капитальные минимальные вложения в производство. Для этого необходимы технологическая конструкция и максимальное использование существующего технологического оборудования и оснастки.

С каждым годом повышается механизация и автоматизация электромашиностроительных заводов. Широко используются станки для механизированной укладки обмотки статоров и якорей электрических машин, применяются высокопроизводительные штампы и прессы. Для сборочных работ используются работы, для изготовления валов и станин применяются автоматизированные линии. В ближайшие годы на заводах будут широко использоваться гибкие автоматизированные комплексы. При проектировании машины необходимо учитывать особенности производства, на котором предполагается изготовление машины.

После распада СССР более 43% производственных мощностей по выпуску электрических машин остались за границей, в странах СНГ. Россия лишилась целого ряда габаритов асинхронных двигателей с высотами оси вращения 63, 71, 80, 90, 200, 222 и 250 мм. В то же время заводы столкнулись с резким спадом спроса на выпускаемую продукцию. Все это потребовало структурной перестройки российских электромашиностроительных предприятий.

Если раньше завод производил асинхронные двигатели одной- двух высот вращения, то теперь потребовалось, например Ярославскому электромашиностроительному заводу ОАО ЯЭМЗ, выпускать двигатели всех модификаций от 0,30 до 100 кВт, Владимирскому электромоторному заводу ВЭМЗ — от 0,1 до 1250 кВт.

Сложившиеся условия потребовали от инженеров-электромехаников новых подходов к проектированию и организации производства электрических машин. Значительно сократились сроки проектирования и подготовки производства небольших, но многообразных модификаций серий электрических машин. Если раньше электромашиностроители диктовали условия для потребителей, то теперь заказчик определяет номенклатуру изделий. Многообразие типов и модификаций машин снизило возможности автоматизации производства и поставило на первый план технологические

возможности быстрого перехода к выпуску мелких партий электрических машин.

Важнейшим требованием при производстве является минимальная материалоемкость электрических машин. Экономия электротехнической стали, меди, алюминия, изоляции и конструкционных материалов является важнейшим требованием при создании новой электрической машины.

Экономия материалов связана с безотходной и малоотходной технологией. При штамповке листов стали статора и ротора в среднем 40% стали идет в отходы, а в некоторых случаях 60…70%. В машинах малой мощности за счет изменения конструкции и технологии изготовления магнитной системы можно значительно уменьшить отходы электротехнической стали [2].

Электрические машины с безотходной технологией изготовления имеют преимущества перед обычными машинами, если сохраняются и требования к машине как к объекту эксплуатации.

Как объект эксплуатации электрическая машина должна иметь высокие энергетические показатели (КПД и $\cos\varphi$). Электрические машины с минимальными потерями позволяют уменьшить вложения материалов в энергосистему. Высокие энергетические показатели электрической машины гарантируют снижение уровня текущих затрат на эксплуатацию и капитальные вложения потребителя.

Улучшение энергетических показателей электрических машин стало особенно актуальным в связи с ростом цен на энергоносители. Вновь разрабатываемые электрические машины должны соответствовать высшей категории качества. Они должны быть надежными и, как правило, иметь срок службы 8…10 лет.

Показатели экономической эффективности электрической машины могут быть установлены на основании анализа приведенных затрат, которые включают затраты на изготовление и эксплуатацию машины.

1.2. ПРОБЛЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Проектирование электрической машины сводится к многократному расчету зависимостей между основными показателями, заданных в виде системы формул, эмпирических коэффициентов, графических зависимостей, которые можно рассматривать как уравнения проектирования. Оптимальное проектирование электрических машин можно представить как поиск оптимальных параметров путем решения этой системы уравнений.

Выбор оптимальных параметров затрудняется сложностью алгоритма расчета электрической машины по формулам проектирования. При проектировании необходимо учитывать стоимость машины, надежность и технологичность конструкции. Эти показатели косвенно входят в формулы

проектирования, что затрудняет оптимизацию. Оптимальные варианты электрической машины выбираются на основании широкого применения вычислительных машин, опыта и интуиции проектировщика [1].

Анализ приведенных затрат применительно к асинхронным двигателям единой серии до 10 кВт показал, что примерно 70% затрат составляют текущие расходы на их эксплуатацию. На долю капиталовложений приходится лишь 15…20% всех затрат. Следовательно, повышение эффективности новых электрических машин связано, прежде всего со снижением эксплуатационных расходов. Первоочередное значение здесь имеют повышение надежности работы машин и улучшение их энергетических показателей, при этом повышение КПД экономически более выгодно, чем повышение $\cos\varphi$.

Повышение надежности и улучшение КПД должны достигаться без заметного увеличения затрат на изготовление электрической машины. Сокращение расходов на электротехническую сталь и обмоточные провода может дать существенное уменьшение себестоимости электрической машины.

Хотя основная заработная плата и составляет 5…8% себестоимости, снижение трудоемкости механических и обмоточно-изолировочных работ имеет важное значение. В свое время в связи с увеличением выпуска электрических машин и недостатком рабочей силы снижение трудоемкости было настолько важно, что в серии 4А пошли на некоторое снижение энергетических показателей, увеличив размеры шлиц пазов для возможности машинной намотки обмотки. Проектирование электрических машин неотделимо от конструирования и технологии изготовления, связанных с условиями, переживаемыми государством.

При оптимизации электрических машин важное значение имеет выбор критерия оптимизации. Выбор критерия оптимизации зависит от назначения электрической машины и предъявляемых к ней требований. Для специальных машин целесообразно выбирать минимум массы или минимальные габариты. Для электрической машины общего назначения в качестве критерия оптимизации принимают минимум приведенных затрат. Этот критерий широко применяется во многих странах. Приведенные затраты на электрическую машину в процессе производства и эксплуатации являются обобщающим экономическим показателем, включающим основные экономические эквиваленты основных технических характеристик. Нельзя найти универсальный критерий оптимальности. Действительно, минимальная масса машины обуславливает снижение энергетических показателей и ухудшение надежности. Наиболее очевидны противоречия между статическими и динамическими характеристиками. Для уменьшения времени разбега асинхронного двигателя надо увеличивать активное сопротивление

обмотки ротора, что вызывает ухудшение энергетических показателей в установившемся режиме.

Выбор критерия оптимизации электрической машины, работающей в автономной энергетической системе, обычно отличается от выбора критерия оптимизации машин общего назначения. Машины автономных энергетических систем в большинстве случаев оптимизируют по минимуму массы, а в передвижных энергетических системах — по минимуму общей массы электрооборудования системы. Если электрическая машина работает при неизменном напряжении, приложенном к ее выводам и не зависящем от нагрузки (сеть бесконечной мощности), задачу оптимизации машины следует проводить по минимуму суммарных затрат.

Задача оптимального проектирования электрической машины или серии машин может быть представлена как общая задача нелинейного математического программирования, которая сводится к нахождению минимума или максимума критерия оптимальности при наличии определенного числа независимых переменных проектирования и функций лимитеров, представляющих собой технические или технологические требования-ограничения к проекту [1,10].

Применение ЭВМ при проектировании для расчетов электрических машин началось в начале 50-Х годов XX в. Во ВНИИЭМ ЭВМ использовались для расчетов серий асинхронных машин. В настоящее время ни один расчет электрических машин не обходится без применения ЭВМ. В большинстве случаев ЭВМ используются для расчетов отдельных частей или всей электрической машины по существующим методикам, что обеспечивает ускорение вычислений, перебор многих вариантов, дает возможность в короткие сроки создать оптимальную электрическую машину.

Внедрение ЭВМ в проектирование привело к существенному повышению технико-экономических показателей электрических машин, снижению сроков проектирования, обеспечило качественный сдвиг в решении задач оптимального проектирования.

При проектировании электрических машин применяются в основном цифровые ЭВМ. Аналоговые ЭВМ удобно применять при решении задач динамики. Недостатками их являются ограниченный объем решаемой задачи и малая универсальность. Цифровые ЭВМ лишены этих недостатков, однако они требуют трудоемкого программирования. Чтобы избежать излишних потерь времени, целесообразно создавать универсальные программы и хранить их в банках данных.

В настоящее время решается задача комплексной автоматизации проектирования электрических машин. Этой цели служит система автоматизированного проектирования электрических машин (САПР ЭМ).

Однако на заводах и НИИ используются свои программы, отличающиеся друг от друга и появившиеся в различное время.

Широкая автоматизация проектных работ изменит в ближайшие годы процесс проектирования электрических машин, произойдут значительные изменения и в учебном проектировании. В гл. 12 описание САПР ЭМ. Данный учебный рассчитан на применение частных программ и мини-ЭВМ, так как пока еще не накоплен достаточный опыт промышленного автоматического проектирования электрических машин, а без использования классических формул проектирования невозможно заниматься и использовать САПР ЭМ.

1.3. РАСЧЕТ ОТДЕЛЬНОЙ МАШИНЫ И СЕРИИ МАШИН

Электрические машины концентрируют энергию магнитного поля в воздушном зазоре. Объем активной части — пространство, в котором размещены сердечники и пазовые части обмоток, определяется произведением Dl_δ (1.1). Размеры D и l_δ называются главными размерами машины.

Расчетная мощность машины

$$P' = mI_{\text{ном}}E, \tag{1.2}$$

где $I_{ном}$ и E — соответственно номинальный ток и ЭДС обмотки статора для асинхронных и синхронных машин, а для машин постоянного тока — номинальный ток и ЭДС якоря; m — число фаз для машин переменного тока (для машин постоянного тока m=1).

Отношение

$$p_{\text{уд}} = P'/(D^2 l_\delta) \tag{1.3}$$

определяет удельную мощность машины, т. е. мощность на единицу активной части. Удельная мощность характеризует степень использования материалов активной части и является важным показателем для сравнения машин различной мощности и конструктивного исполнения.

Более общим критерием оптимизации является отношение момента, развиваемого машиной, к объему ее активной части, которое называют коэффициентом использования

$$k_{\text{и}} = \frac{P'/\Omega}{D^2 l_\delta} = \frac{M}{D^2 l_\delta}. \tag{1.4}$$

Здесь Ω — угловая скорость ротора, а P'/Ω — момент на валу машины, Н·м; D — диаметр (внутренний или внешний), см; l_δ — расчетная длина машины, см.

Эффективность использования объема активной части машины определяется электромагнитными нагрузками, линейной нагрузкой A и

индукцией в воздушном зазоре B_δ. Линейная нагрузка определяется отношением тока всех витков обмотки к длине окружности. Ее значение показывает, какой ток приходится в среднем на единицу длины окружности зазора машины. Индукция в воздушном зазоре при данных диаметре по зазору и числе полюсов определяет поток машины и, следовательно, уровень индукции в участках магнитопровода.

Чем больше A и B_δ, тем больше коэффициент использования объема активной части $k_и \sim AB_\delta$. Однако с ростом мощности машины $k_и$ увеличивается. Это объясняется тем, что с увеличением объема активной части площадь, с которой отводится тепло, увеличивается быстрее, чем объем машины. Если объем машины пропорционален линейному размеру в третьей степени, то поверхность этого объема пропорциональна линейному размеру в четвертой степени.

Лучшие условия охлаждения в машинах большой мощности позволяют выбирать большие A и B_δ, что обеспечивает лучшее использование материалов. Поэтому машинная постоянная C_A остается «постоянной» лишь в определенном диапазоне мощностей. С повышением мощности растет и C_A.

Наибольшие допустимые уровни электромагнитных нагрузок для конкретных машин определяются допустимым нагревом активных частей, так как с ростом A и B_δ увеличиваются потери в единице активного объема машины. На основании опыта проектирования и эксплуатации электрических машин выработаны определенные диапазоны возможных значений A и B_δ для различных типоразмеров машин, при которых нагрев их активных частей не превышает допустимого для принятого класса изоляции обмоток. Значения электромагнитных нагрузок задаются в виде рекомендаций в соответствующих расчетов методиках и служат основной для правильного выбора объема активной части. С развитием теории и практики электромашиностроения коэффициент использования объема активной части машин повышается.

Переход на более нагревостойкую изоляцию позволяет рассчитать машины на большие превышения температуры обмоток, что дает возможность при той же мощности уменьшить габариты машины.

То же самое происходит, если в машине применена более совершенная система охлаждения — водородная, жидкостная, форсированные системы или внутреннее охлаждение. В этих случаях при том же превышении температуры способность рассеивать тепло также возрастает, и объем активной части машины может быть уменьшен. Однако при слишком больших нагрузках значительно снижаются КПД и $\cos\varphi$. [5].

Использование новых сортов электротехнических сталей с лучшими магнитными свойствами и меньшими удельными потерями и новых электроизоляционных материалов, позволяющих уменьшить толщину

изоляции и за счет этого снизить плотность тока в обмотках, приводит к уменьшению потерь и необходимого объема активной части.

Поиски новых конструктивных решений, применение вычислительных машин, новых методов оптимизации, обобщение опыта проектирующих организаций позволяют создавать электрические машины с лучшими энергетическими характеристиками и меньшей массой.

За счет применения новых электроизоляционных и магнитных материалов, совершенствования конструкции и систем охлаждения, развития теории и применения ЭВМ удалось снизить массу электротехнических машин общего назначения в 2-3 раза (см. рис. 1.1).

При проектировании новых машин и, в частности, при выполнении учебных проектов необходимо ориентироваться на современное конструктивное исполнение электрических машин, предусматривать применение новых электротехнических материалов.

Ориентируясь на рекомендованные в методиках значения электромагнитных нагрузок и используя выражение для машинной постоянной, можно достаточно точно найти объем активной части проектируемой машины $D^2 l_\delta$, при котором ее превышение температуры будет соответствовать допустимому. Однако этот объем может быть получен при различных сочетаниях значений D и l_δ. Аналитических зависимостей, однозначно определяющих эти величины для конкретных машин, не существует. В практике проектирования предварительно определяют диаметр D. Для этой цели обычно используют кривые, характеризующие среднюю зависимость $D = f(P/n)$ для большого числа построенных и эксплуатируемых машин данного типа (где P — мощность машины). После этого с учетом выбранных электромагнитных нагрузок определяют l_δ, исходя из машинной постоянной.

Проверкой правильности выбора D является значение отношения l_δ / D или более часто принятое в практике отношение $\lambda = l_\delta / \tau$, где полюсное деление $\tau = \pi D / 2p$. Число полюсов обычно известно или определяется из технического задания.

Значение λ характеризует основные размерные соотношения в машине. Большие λ имеют машины относительно малого диаметра и большой длины, и, наоборот, малые значения λ — короткие машины с большим диаметром. В первом случае машины имеют меньшую массу и меньшую высоту оси вращения. В них лучше используется медь, так как длина лобовых частей катушек по сравнению с длиной их пазовых частей становится меньше. Момент инерции машин меньше при больших λ, чем при малых λ, что особенно важно при проектировании двигателей, предназначенных для работы с частыми пусками.

Однако относительное увеличение длины машины при больших λ затрудняет условия их охлаждения, а в машинах постоянного тока приводит к ухудшению коммутации. В машинах небольших габаритов с увеличением λ возникают трудности с выполнением необходимого для нормальной работы числа пазов.

Анализ этих зависимостей и опыт эксплуатации позволили определить для различных типов машин диапазон значений λ, при которых обеспечиваются их экономичность и хорошие эксплуатационные данные. Эти рекомендации служат критерием проверки правильности предварительного выбора D для проектируемой машины. Конкретные диапазоны возможных λ для различных типов машин приведены в соответствующих главах книги.

При проектировании индивидуальной машины необходимо по возможности использовать имеющиеся на заводе штампы, модели, шаблоны и т. п. и так выбирать размеры, чтобы, максимально использовать существующие узлы и детали.

В индивидуальном исполнении проектируют только машины для специальных применений. Обычно электрические машины выпускают сериями. Серия — ряд машин возрастающей мощности, имеющих одну конструкцию и единую технологию производства на больших участках серии и предназначенных для массового производства. При проектировании серий машин важнейшее значение имеют вопросы унификации деталей, конструктивных узлов и нормализации ряда размеров. Все это связано с рациональной организацией производства как внутри завода, так и в объединении, выпускающем единую серию машин. При этом необходимо заботится об экономической эффективности целой серии машин, а не одной машины.

При проектировании серий асинхронных машин выбирают внешние диаметры статора таким образом, чтобы при одном и том же диаметре при изменении длины машины получить несколько машин на различные мощности и частоты вращения. Для машин постоянного тока выбирают одинаковым диаметр якоря и, изменяя длину машины, проектируют на нем несколько машин различной мощности и на разные частоты вращения.

Такое построение серий приводит к сокращению количества штампов, уменьшению количества моделей для отливки станин и подшипниковых щитов, сохранению одних и тех же диаметров валов, унификации подшипниковых щитов, сокращению количества оснастки и измерительного инструмента. Широкая унификация облегчает применение гибких автоматизированных производств, облегчает кооперацию между заводами.

Проблема создания единых отечественных серий электрических машин возникла в конце 20-х г., когда машины выпускались по иностранным чертежам. Начало работ по созданию единой серии асинхронных двигателей заводом «Электросила» и Харьковским электромашиностроительным заводом (ХЭМЗ) относится к 1928—1929 гг. «Электросила» разработала

серии АД мощностью 1…10 кВт и АМ — свыше 100 кВт. ХЭМЗ разработал серию МА-200 мощностью до 100 кВт.

В 1943 г. Баранчинский электромашиностроительный завод выпустил серию «Урал» мощностью 1…13 кВт, заменившую серию АД.

Первая единая всесоюзная серия асинхронных двигателей А (с короткозамкнутым роторам) и АК (с фазным ротором) появилась в 1952—1956 гг. Серия имела твердую шкалу мощностей и высокую степень унификации.

В 1964—1968 гг. ЦПКТБ крупных электрических машин (г. Ленинград), московский завод им. Владимира Ильича (ЗВИ) и Баранчинский электромеханический завод разработали серию А2 мощностью свыше 100 кВт, в которой уровень использования активных материалов был повышен на 20…25% по сравнению с ранее выпускавшимися сериями.

В начале 90-х гг. в странах СЭВ (ГДР, ЧССР, НРБ) и СССР была создана серия 4А, включавшая двигатели до 400 кВт. В серии 4А за счет применения новых электротехнических материалов и рациональной конструкции мощность двигателей при тех же высотах оси вращения была повышена на 2—3 ступени.

В 80-х гг. организацией социалистических стран Интерэлектро была разработана серия АИ. Асинхронные двигатели серии АИ при диапазонах мощности 0,25…315 кВт на 18 высотах оси вращения 45…355 мм обладали высокими энергетическими показателями, повышенной надежностью и низким уровнем шума [5].

На базе единых серий изготовляются двигатели различных исполнений, предназначенные для работы в специальных условиях. Так, на базе серии 5А и РА выпускаются следующие электрические модификации: с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, 10-полюсные и 12-полюсные, многоскоростные, на частоту сети 60 Гц, однофазные, с фазным ротором и другие, специализированные по таким конструкциям: встраиваемые, с встроенным электромагнитным тормозом, малошумные, с встроенной температурой защиты, с повышенной точностью по установочным размерам, высокоточные; специализированные по следующим условиям окружающей среды: влагоморозостойкие, химостойкие, тропические; узкоспециализированного исполнения: для сельского хозяйства, для судов морского флота, для холодного климата, лифтовые, фреономаслостойкие, полиграфические, швейные и др.

Непрерывно возрастающие требования к современным системам электропривода могут быть удовлетворены только при применении регулируемых электродвигателей переменного тока, работающих с преобразователями частоты, и, прежде всего, двигателей постоянного тока.

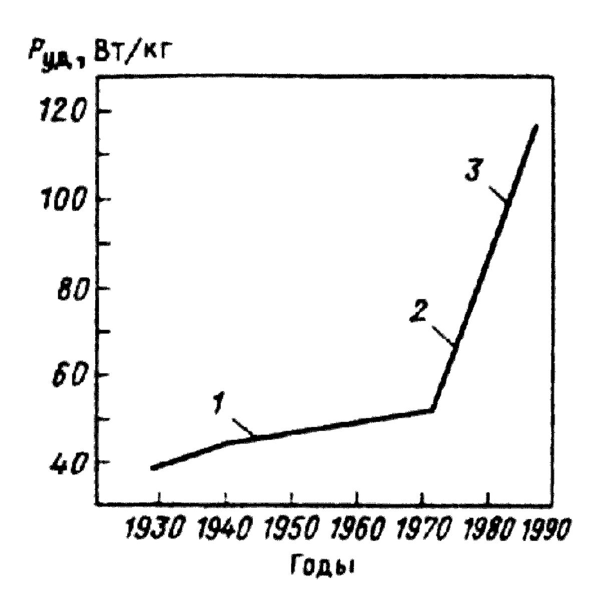


Рис. 1.2. Снижение массы двигателей постоянного тока:
1 —станина круглая; *2* станина квадратная, улучшенная вентиляция;
3 — форсированное охлаждение

Первой общесоюзной серией машин постоянного тока с нормализованной шкалой номинальных мощностей и частот вращения была серия П, созданная в 1956 г.

В 1974 г. в серии 2П впервые были применены установочно-присоединительные размеры двигателей, увязанные с номинальной мощностью, в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК). По сравнению с серией П в двигателях серии 2П при одной и той же высоте оси вращения увеличена в 3—5 раз, а диапазон регулирования — в 1,6 раза.

Стремление удовлетворить потребность в широко регулируемых двигателях для гибких автоматизированных систем и робототехники привело к созданию в 1984 г. двигателей серии 4П. В двигателях этой серии применены компенсационная обмотка, шихтованный магнитопровод, квадратная станина, изоляция класса нагревостойкости F и форсированное охлаждение [5].

За счет улучшения конструкции, форсированного охлаждения и применения изоляционных материалов, допускающих более высокие превышения температуры, удалось в течение 50 лет снизить расход материалов в 3 раза (рис. 1.2).

В серии 4П проведена унификация по деталям, сборочным единицам и в целом конструкции машин постоянного тока с асинхронными двигателями серий 4А и АИ. Это позволяет обеспечить дальнейшую кооперацию производства двигателей и снизить их себестоимость.

Многочисленные конструкции асинхронных и синхронных машин представлены в гл. 9… 11.

1.4. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ИСПОЛНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН.

Почти все электрические машины имеют вращательное движение, причем вращается одна часть машины – ротор.

Независимо от рода питания (постоянного или переменного тока) электрические машины можно разделить на явно- и неявнополюсные.

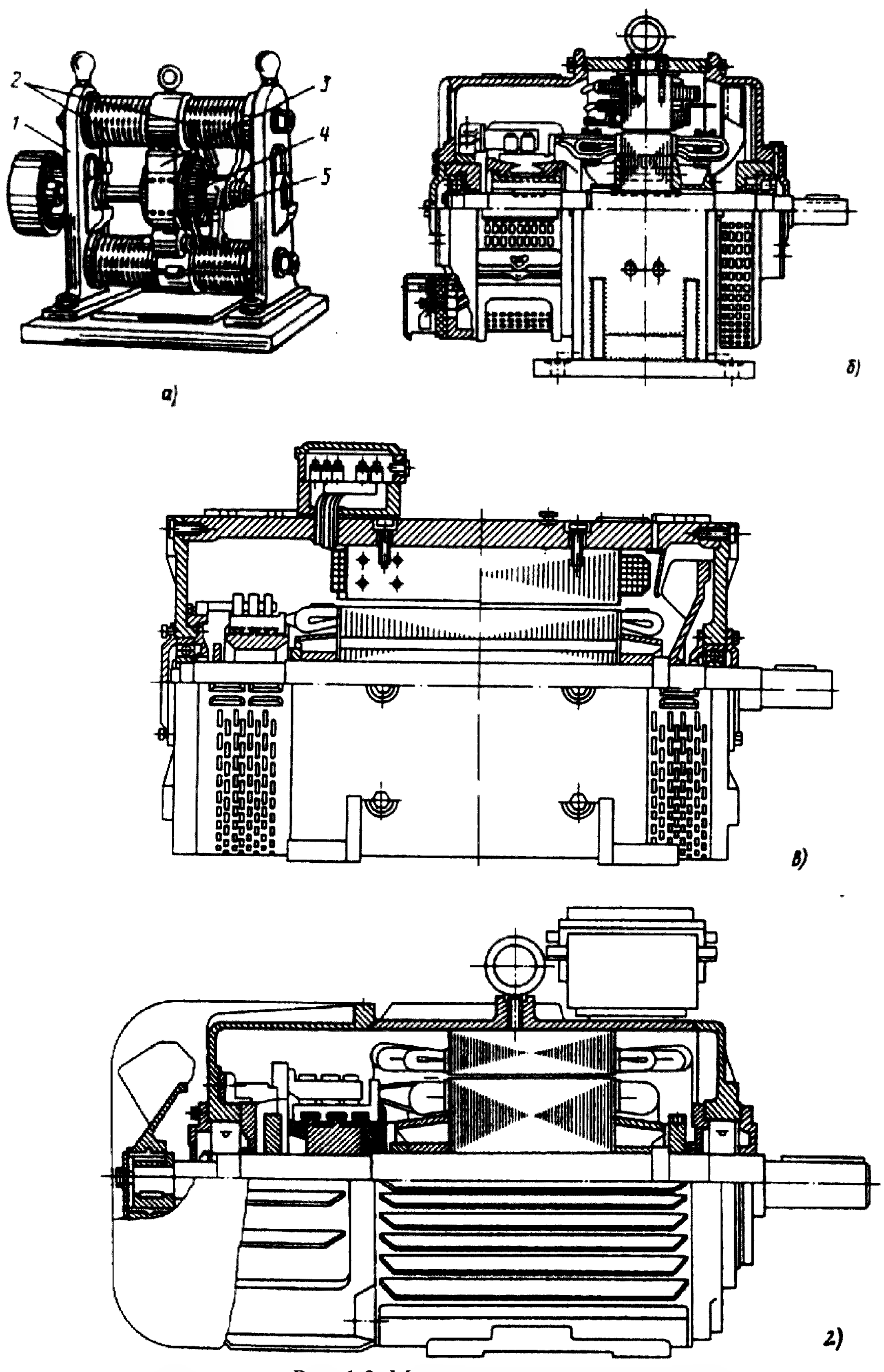


Рис. 1.3. Машины постоянного тока:
а — фирма «Альянс», *б* — серии ПН; *в* — серии 2П, *г* — серии 4П

К неявнополюсным машинам относятся асинхронные машины и быстроходные синхронные машины (турбогенераторы и турбодвигатели).

Явно выраженные полюсы располагают либо на роторе (синхронные машины), либо на статоре (машины постоянного тока). В специальных случаях машины постоянного тока могут быть с вращающимися обмотками возбуждения, а синхронные машины – с неподвижными. Такие машины принято называть обращенными.

За 100 лет промышленного применения электрических машин их конструкция претерпела значительные изменения. На рис. 1.3, *а* дана одна из первых конструкций машины постоянного тока, сконструированной З. Граммом и изготовленной фирмой «Альянс» в середине семидесятых годов XIX века. В этой машине на станине *1* укреплены электромагниты *2* с полюсными наконечниками *3,* между которыми вращается якорь *4*. Щетки скользят по коллектору *5*.

На рис. 1.3, *б* представлен общий вид машины постоянного тока серии ПН, которая выпускалась в СССР после Отечественной войны. На рис. 1.3, *в* дана конструкция машины серии 2П, которая выпускалась в начале 70-х годов XX в.

Конструкция машины новой серии 4П показана на рис. 1.3, *г*. Эта унифицированная конструкция, имеющая ряд деталей, заимствованных от серии асинхронных машин 4А, выпускается с середины 80-х годов XX в.

Условия, в которых работают электрические машины, классифицируют по ряду признаков (направление оси вала, чистота окружающего воздуха, его температура, влажность и т.п.), в зависимости от которых выпускают машины различных конструктивных исполнений.

При эксплуатации электрических машин возникает необходимость устанавливать их не только в горизонтальном, но и в вертикальном положениях. В зависимости от способа крепления, направления оси вала и конструкции подшипниковых узлов конструктивные исполнения машин по способу монтажа делят на девять конструктивных групп (ГОСТ 2479), каждая из которых подразделяется, в свою очередь, на несколько форм исполнения. Условное обозначение содержит буквы латинского алфавита IM и четыре цифры. Первая цифра определяет группу конструктивного исполнения (от 1 до 9), вторая и третья – способ монтажа и направление конца вала, четвертая – исполнение конца вала (от 0 до 8).

Структура условного обозначения конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа:

$$\text{IM}\ \underset{1}{\underline{X}}\ \underset{2}{\underline{X}}\ \underset{3}{\underline{X}}\ \underset{4}{\underline{X}}$$

Группы конструктивных исполнений:

1 – на лапах с подшипниковыми щитами (с пристроенным редуктором);

2 – на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах);

3 – без лап, с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах), с цокольным фланцем;

4 – без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;

5 - без подшипниковых щитов;

6 – на лапах с подшипниковыми щитами и стояковыми подшипниками;

7 – на лапах со стояковыми подшипниками (без щитов);

8 – с вертикальным валом, кроме групп от IM1 до IM4;

9 – специального исполнения по способу монтажа.

Исполнения концов вала (концом вала называется его часть, выступающая за подшипник):

0 – без конца вала;

1 – с одним цилиндрическим;

2 – с двумя цилиндрическими;

3 – с одним коническим;

4 – с двумя коническими;

5 – с одним фланцевым;

6 – с двумя фланцевыми;

7 – с фланцевым со стороны привода и цилиндрическим на противоположной стороне;

8 – все прочие исполнения концов вала.

Примеры условного обозначения форм конструктивного исполнения электрических машин приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. **Примеры условного обозначения форм конструктивного исполнения электрических машин**

Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
IM1 Машины на лапах с подшипниковыми щитами	С двумя подшипниковыми щитами, на лапах, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM 1001
	То же, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вниз	IM 1011

Продолжение таблицы 1.1		
Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
IM2 Машины на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах)	На лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM 2001
	На лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, недоступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вверх	IM 2131
IM3 Машины без лап, с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах)	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на стороне *D*, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM 3001
	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцами, доступными с обратной стороны на обоих подшипниковых щитах, вал вертикальный с цилиндрическим концом	IM 3912
IM4 Машины без лап с фланцем на станине	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на стороне *D*, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM 4001
	С одним подшипниковым щитом, с фланцем на стороне *N*, доступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вверх	IM 4731
IM5 Машины без подшипниковых щитов	Без станины с ротором и горизонтальным валом с цилиндрическим концом	IM 5001
	Со станиной на лапах, с ротором, без вала	IM 5410
IM6 Машины с подшипниковыми щитами и стояковыми подшипниками	На лапах с двумя подшипниковыми щитами, с одним стояковым подшипником на стороне *D*, без фундаментальной плиты	IM 6000

Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
	Со станиной на лапах, с фундаментальной плитой, с одним стояковым подшипником на стороне *N*, с одним подшипниковым щитом	IM 6211
IM7 Машины со стояковыми подшипниками (без подшипниковых щитов)	Без фундаментальной или опорной плиты, станина на лапах, с одним стояковым подшипником	IM 7001
	С фундаментальной плитой на приподнятых лапах, с двумя стояковыми подшипниками	IM 7610
IM8 Машины с вертикальным валом, кроме машин групп от IM1 до IM4	С подпятником и направляющим подшипником, расположенными под ротором, с валом, без маховика	IM 8201
	С подпятником и направляющим подшипником, расположенными под ротором, с валом, без маховика	IM 8411
IM9 Машины специального исполнения по способу монтажа	Встраиваемое исполнение с цилиндрической станиной (или без станины), с двумя подшипниковыми щитами, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM 90001
	С двумя подшипниковыми щитами на лапах в горизонтальной плоскости, вал вертикальный с цилиндрическим концом	IM 9631

Примечание. Под стороной вала *D* понимается сторона, обращенная к приводному механизму для двигателей, а для генераторов – сторона, обращенная к турбине или дизелю. При двух концах вала *D* – сторона вала с концом большего размера, а при равных диаметрах для машин на лапах с коробкой выводов, расположенных не сверху, - сторона, с которой коробка выводов видна справа. *N* – сторона вала, противоположная *D*.

Более подробно конструктивное исполнение электрических машин по способу монтажа рассмотрено в [16].

Электрические машины эксплуатируются в различных климатических условиях, различной влажности, температуре окружающего воздуха, давлении (различной высоте над уровнем моря), в атмосфере, содержащей те

или иные коррозионно-активные элементы, и при других условиях, существенно отличающихся от нормальных. В нашей стране за нормальные условия принимают температуру окружающей среды $(+25 \pm 10)^0$ С, относительную влажность воздуха 35…80% и атмосферное давление 84…106 кПа. Чем более отличны условия, в которых эксплуатируется машина, от нормальных, тем значительнее отличается конструкция ее корпуса, обмоток, различных уплотнений и изоляции от принятых в машинах общего назначения. ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-89Е классифицируют макроклиматические районы и места установки машин в зависимости от факторов, влияющих на условия эксплуатации электрических машин, и определяют обозначения машин, предназначенных для работы в тех или иных условиях (табл. 1.2).

Таблица 1.2. **Условное обозначение климатического исполнения электрических машин**

Исполнение	Обозначение
Электрические машины, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах для макроклиматических районов: с умеренным климатом	У
с холодным климатом	ХЛ
с влажным тропическим климатом	ТВ
с сухим тропическим климатом	ТС
как с сухим, так и с влажным тропическим климатом	Т
для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение)	О
Электрические машины, предназначенные для установки на морских судах для макроклиматических районов: с умеренно холодным морским климатом	М
с тропическим морским климатом для судов каботажного плавания или иных, предназначенных для плавания только в тропической зоне	ТМ
для неограниченного района плавания	ОМ
Электрические машины, предназначенные для всех макроклиматических районов на суше и на море	В

Категория размещения электрических машин обозначается цифрой (от 1 до 5), следующей за буквенным обозначением климатического исполнения. Машины, которые можно эксплуатировать на открытом воздухе обозначаются цифрой 1, в закрытом помещении, где температура и влажность воздуха несущественно отличаются от колебаний наружного воздуха, — 2, если машины рассчитаны на работу в закрытых помещениях, в которых колебания температуры и влажности, а также воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе, — 3; в помещениях с

искусственно регулируемыми климатическими условиями, например в закрытых отапливаемых помещениях, — 4; в помещениях с повышенной влажностью, в которых возможно длительное наличие воды и происходит частая конденсация влаги на стенах и потолке, например в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях, —5.

Обозначение ХЛ1 означает, что машина может работать в районах с холодным климатом при установке на открытом воздухе. Двигатели общего назначения, к которым не предъявляют каких-либо дополнительных требований, имеют исполнение У3 или У4 , т. е. они могут работать в районах с умеренным климатом в закрытых помещениях категории 3 или 4.

Существуют исполнения по степени защиты от попадания внутрь машины твердых посторонних тел и воды и от соприкосновения обслуживающего персонала с токоведущими и вращающимися частями, находящимися внутри машины. Этот вид исполнения обычно называют исполнением по степени защиты. ГОСТ 14254—80 устанавливает буквенно-цифровое обозначение исполнения, состоящее из латинских букв IP и двух цифр. Первая цифра (от 0 до 6) характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, находящимися внутри машины, а также степень защиты самой машины от попадания в нее твердых посторонних тел; вторая цифра (от 0 до 8) — степень защиты машины от проникновения в нее воды (табл. 1.3 и 1.4).

Таблица 1.3. **Степень защиты обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями электрических изделий и от попадания твердых тел внутрь корпуса**

Первая цифра условного обозначения	Степень защиты
0	Специальная защита отсутствует
1	Защита от проникновения внутрь оболочки большого участка поверхности человеческого тела, например руки, и от проникновения твердых тел размером свыше 50 мм
2	Защита от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной не более 80 мм и от проникновения твердых тел размеров свыше 12 мм
3	Защита от проникновения внутрь оболочки инструментов, проволоки и т. д. диаметром или толщиной более 2,5 мм и от проникновения твердых тел размером более 1 мм
4	Защита от проникновения внутрь оболочки проволоки и от проникновения твердых тел размером более 1 мм
5	Проникновение внутрь оболочки пыли не предотвращено полностью. Однако пыль не может проникать в количестве, достаточном для нарушения работы изделия
6	Проникновение пыли предотвращено полностью

Таблица 1.4. **Степени защиты электротехнических изделий от проникновения воды**

Вторая цифра условного обозначения	Степень защиты
0	Специальная защита отсутствует
1	Защита от капель воды: капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие
2	Защита от капель воды при наклоне оболочки до 15^0: капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать вредного воздействия на изделие при наклоне его оболочки на любой угол до 15^0 относительно нормального положения
3	Защита от дождя: дождь, падающий на оболочку под углом 60^0 от вертикали, не должен оказывать вредного воздействия на изделие
4	Защита от брызг: вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на изделие
5	Защита от водяных струй: струя воды, выбрасываемая в любом направлении на оболочку, не должна оказывать вредного воздействия на изделие
6	Защита от волн воды: вода при волнении не должна попадать внутрь оболочки в количестве, достаточном для повреждения изделия
7	Защита при погружении в воду: вода не должна проникать в оболочку, погруженную в воду, при определенных условиях давления и времени в количестве, достаточном для повреждения изделия
8	Защита при длительном погружении в воду: изделия пригодны для длительного погружения в воду при условиях, установленных изготовителям

Открытые машины, в конструкции которых не предусмотрено никаких мер для защиты, обозначаются IP00. Наиболее распространенными исполнениями по степени защиты являются IP22, IP23 и IP44. Первые два исполнения соответствуют защите от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины пальцев человека и твердых тел диаметром более 12 мм (первая цифра 2 в обозначениях), а также защите от попадания в них капель воды. Исполнение IP22 предусматривает защиту от проникновения внутрь машины капель, падающих под углом не более 15^0 к вертикали, а исполнение IP23 — под углом, не превышающим 60^0 к вертикали. Машины исполнений IP22 и IP23 называют каплезащищенными.

Машины исполнения IP44 выполнены защищенными от возможности соприкосновения инструментов, проволоки или других подобных предметов, толщина которых не превышает 1 мм, с токоведущими частями, а также от попадания внутрь машины твердых тел диаметром более 1 мм (первая цифра 4). Вторая цифра 4 обозначает, что машина защищена от попадания внутрь

корпуса водяных брызг любого направления. Такие машины называют также брызгозащищенными.

Для специальных целей выпускают электрические машины с более высокой степенью защиты, например IP57. В этом исполнении машина защищена от попадания пыли внутрь корпуса и может работать, погруженной в воду.

Исполнение по способу охлаждения электрических машин определяет ту или иную систему вентиляции, расположение вентилятора и систему забора охлаждающего воздуха. Машина исполнений IP22 и IP23 обычно выполняют с самовентиляцией и продувом воздуха через машину, при этом вентилятор располагается на валу машины, а воздух, проходя внутри корпуса, охлаждает обмотку и сердечники. Машины исполнения IP44 в большинстве случаев имеют наружный обдув. Охлаждающий воздух при этой системе охлаждения прогоняется вдоль наружной поверхности оребренного корпуса с помощью вентилятора, установленного вне корпуса на выступающем конце вала и с противоположной стороны от его выходного конца. Более подробно системы вентиляции и исполнения машин по способу их охлаждения рассмотрены в приложении П8.1—8.3 и в последующих главах [16].

Все эти электрические машины имеют много общего в конструкции обмоток, сердечников, валов, торцевых щитов, подшипниковых узлов и корпусов. Однако различия в требованиях, предъявляемых при эксплуатации, не позволяют создать полностью идентичные конструкции всех типов электрических машин, так же как и методов их расчета и проектирования. Каждый из типов машин (асинхронные, синхронные и машины постоянного тока) имеет свои особенности конструкции.

Асинхронные двигатели выпускают двух типов: с роторами, имеющими фазную обмотку, и с короткозамкнутыми роторами. Более распространены двигатели с короткозамкнутыми роторами, так как отсутствие изоляции обмотки роторов и скользящих контактов делает их наиболее дешевыми в производстве и надежными в эксплуатации. Основным недостатком таких двигателей является отсутствие надежного и экономичного способа плавного регулирования частоты вращения.

В настоящее время нашли применение вентильные двигатели, выполненные на базе асинхронных или синхронных двигателей с коммутаторами на тиристорах или транзисторах. Вентильные двигатели занимают среднее положение между двигателями постоянного тока и двигателями синхронными и асинхронными и применяются там, где необходимо изменять частоту вращения, а наличие коллектора и щеток нежелательно. Коммутатор, как правило, выполняется отдельно, а конструкция асинхронного или синхронного двигателя мало отличается от обычной [14].

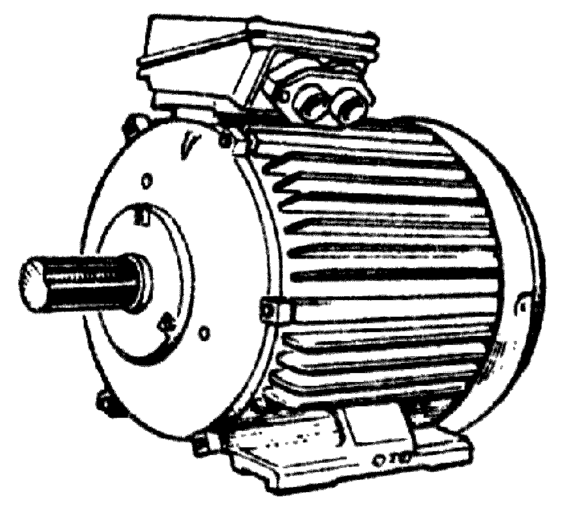


Рис. 1.4. Асинхронный двигатель серии 4А в закрытом обдуваемом исполнении 4А160УЗ

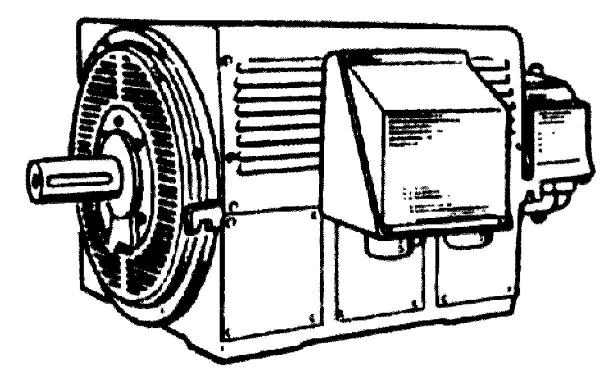


Рис. 1.5. Асинхронный двигатель с фазным ротором с квадратной станиной

Асинхронные двигатели общего назначения выпускаются на низкое напряжение мощностью от 0,6 до нескольких сотен киловатт и на высокие напряжения (3,6 или 10 кВ) мощностью до нескольких десятков тысяч киловатт. Наиболее распространены низковольтные двигатели малой и средней мощности.

На рис. 1.4 показан асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 15 кВт при $2p = 4$ на напряжение 220/380 В. Конструктивная форма исполнения двигателя IM1001, исполнение по степени защиты IP44. Такое исполнение характерно для большинства асинхронных машин мощностью менее 50…70 кВт. Низковольтные двигатели большей мощности с фазными и с короткозамкнутыми роторами выпускаются в большинстве случаев в двух исполнениях – IP23 и IP44.

На рис. 1.5 показан асинхронный двигатель серии 4А с фазным ротором мощностью 250 кВт при $2p = 4$, исполнение по степени защиты IP23. Основной конструкцией асинхронных двигателей являются серии 4АМ и АИ, которые отличаются друг от друга выполнением корпуса и подшипниковых узлов. Активные части в этих сериях идентичны.

Синхронные машины общего назначения распространены значительно меньше, чем асинхронные. Синхронные генераторы сравнительно небольшой мощности (до нескольких тысяч киловатт) применяются в автономных установках. Синхронные двигатели не получили широкого распространения из-за более сложной конструкции, большей стоимости и худших пусковых характеристик. Они находят применение в приводах компрессоров, воздуходувок и т. п. Синхронные машины могут быть использованы одновременно и как двигатели, и как генераторы реактивной энергии, что дает им большое преимущество перед асинхронными двигателями, являющимися потребителями реактивной энергии.

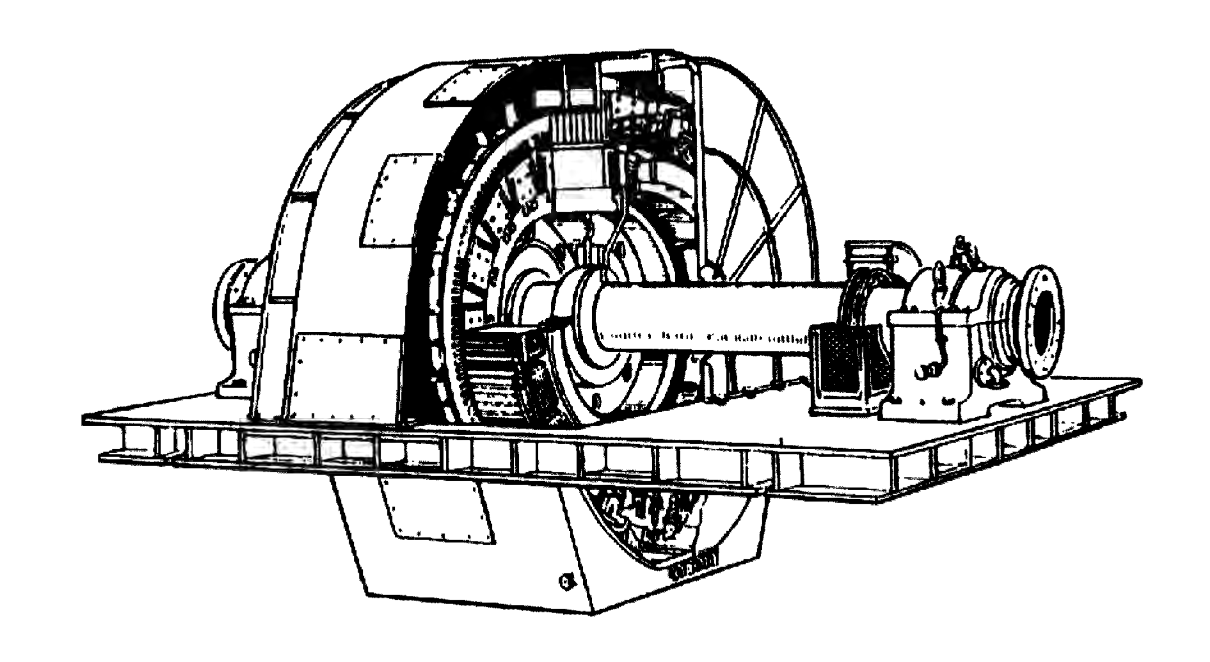


Рис. 1.6. Синхронный двигатель

Синхронные машины в зависимости от конструкции ротора делятся на явно– и неявнополюсные.

В явнополюсной конструкции более удобно располагать обмотку возбуждения, чем в пазах ротора с неявновыраженными полюсами. Поэтому все синхронные машины с числом пар полюсов более двух выполняются с явнополюсным ротором. В двухполюсных машинах из-за большой частоты вращения центробежные силы, действующие на ротор, настолько велики, что не удается надежно закрепить на нем явно выраженные полюсы с обмоткой. Обмотку возбуждения приходится укладывать в отдельные пазы, рассредоточивая их по окружности ротора.

Синхронные машины общего назначения выполняют, в основном, с явнополюсными роторами. На рис. 1.6 показан синхронный двигатель мощностью 17500 кВт на частоту вращения 375 об/мин. Из-за большой массы вала и ротора его подшипниковые узлы установлены на подшипниковых стойках вне корпуса машины.

Наряду с крупными синхронными машинами выпускают синхронные двигатели и генераторы мощностью менее 100 кВт на низкое напряжение. Для упрощения эксплуатации и повышения надежности они выполнятся с самовозбуждением (обмотка возбуждения питается постоянным током от выводов статора через выпрямитель). В настоящее время разработаны конструкции синхронных машин, в которых отсутствует скользящий контакт, при этом выпрямительные элементы установлены на роторе, а ток в обмотке возбуждения возникает за счет высших гармоник поля или с помощью бесконтактного возбудителя.

Двигатели постоянного тока допускают плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне, обладают высокими пусковыми и

перегрузочными моментами. Это определило их распространение в приводах, требующих изменения частоты вращения или специальных скоростных характеристик: в станкостроении, электротранспорте, в металлургической, текстильной и полиграфической промышленностях, других отраслях народного хозяйства.

Генераторы постоянного тока применяют для питания обмоток возбуждения синхронных машин, в системах генератор—двигатель и в некоторых специальных производствах, как, например, в химической промышленности для целей электролиза и т. п.

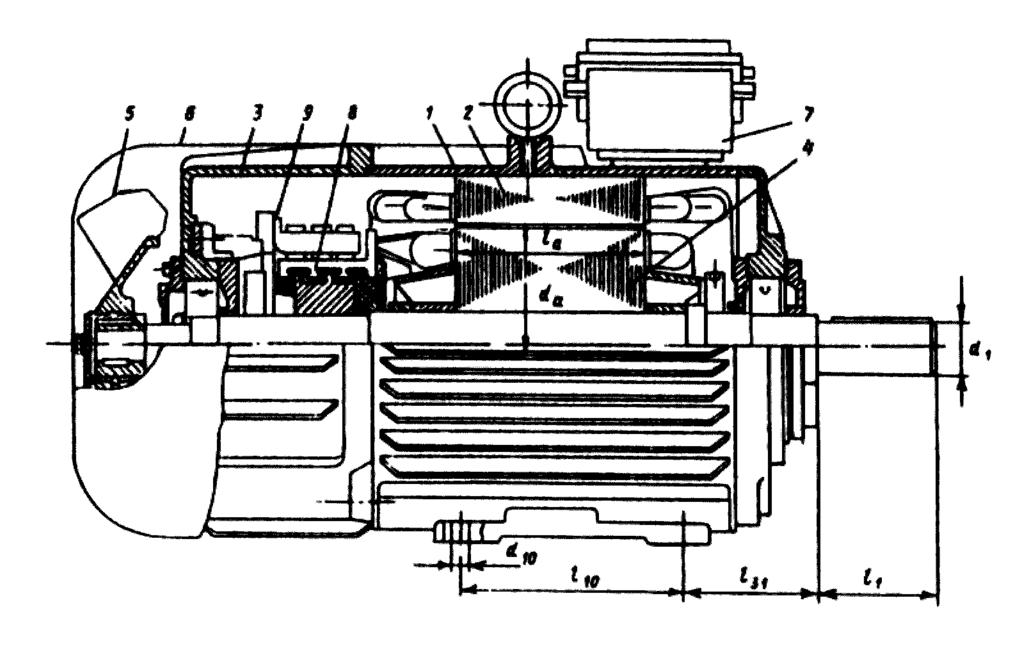
В то же время машины постоянного тока не получили такого широкого распространения, как асинхронные, из-за меньшей надежности, сложности эксплуатации и большей стоимости, обусловленных наличием в их конструкции механического преобразователя частоты коллектора. Эти машины могут иметь различные конструкции коллектора, якоря, обмоток и полюсов. Машина постоянного тока общего назначения, проектирование которых рассмотрено в последующих главах, имеют вращающийся якоря, цилиндрический коллектор и неподвижные полюсы с обмотками возбуждения, расположенными на станине.

На рис. 1.7 показан двигатель постоянного тока мощностью 110 кВт и номинальной частотой вращения 1500 об/мин, исполнения по степени защиты IP22. Такое исполнение является типичным для двигателей постоянного тока общего назначения, так как они большей частью устанавливаются, в которых исключается попадание на машины капель, падающих под углом более 15^0 к вертикали.

С каждым годом в конструкцию серий машин переменного и постоянного тока вводится все большая унификация, различные узлы и детали машин стремятся делать одинаковыми. В то же время применение гибких автоматизированных производств позволяет выполнять большее число модификаций на основе базовой модели.

В последние десятилетия проявляется тенденция к объединению электрических машин с управляющими силовыми полупроводниковыми элементами и микропроцессорами. При этом вентильные двигатели наряду с асинхронными двигателями и двигателями постоянного тока находят все большее применение. Создание серий электромеханических систем для широкого класса электроприводов внесет новые изменения в конструкцию электрических машин.

Унификация и стандартизация в электрической промышленности. Стандартизация является частью общегосударственной технической политики, средством внедрения в производство передовых достижений науки, обеспечения оптимального уровня качества продукции, экономии трудовых и материальных затрат. Унификация базируется на анализе требований различных министерств и ведомств к разработке единой серий электрооборудования.



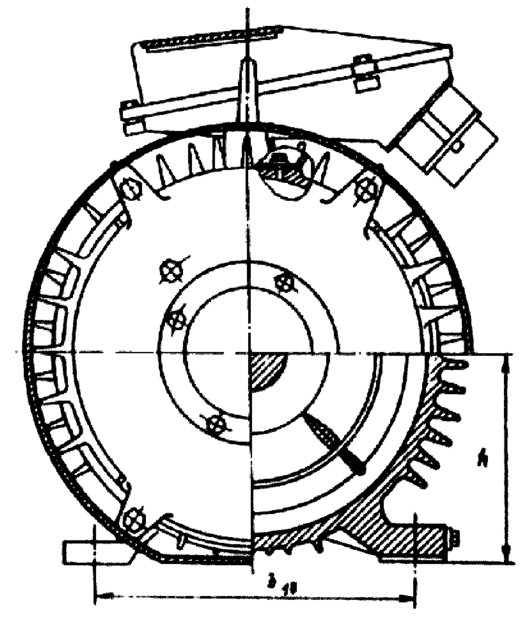


Рис. 1.7. Продольный и поперечный разрезы двигателя постоянного тока серии 4ПО

1 — корпус; *2* — магнитопровод статора; *3* — щит подшипниковый передний;
4 — сердечник якоря; *5* — вентилятор; *6* — кожух; *7* — коробка выводов;
8 — коллектор; *9* — токосъемный аппарат

На базе единых серий машин и трансформаторов разрабатываются модификации, предназначенные для различных условий работы. Внутри серии проводится максимальная унификация узлов и деталей.

Стандартизация в электротехнической промышленности строится на базе государственной системы стандартизации. Стандарты являются обязательными в пределах установленной сферы их действия, области и условий их применения.

Кроме стандартов утверждаются технические условия (ТУ), представляющие собой распространенный вид нормативно-технической документации.

В основу стандартизации подотраслевой электротехнической промышленности положены базовые стандарты. Таким стандартом для электрических машин является ГОСТ 183, устанавливающий общие технические требования на все электрические машины. На основе единых стандартов устанавливаются стандарты на единые серии (например, на асинхронные, синхронные машины и др.).

При стандартизации электрооборудования применяются ряды предпочтительных чисел, построенные на геометрической прогрессии:

$$\grave{a}; ax; ax^2; ...; ax^{n-1}.$$

Оказалось достаточным иметь четыре десятичных ряда геометрической прогрессии:

Ряд	Знаменатель ряда	Количество членов в пределах ряда
R5	$\varphi_5 = \sqrt[5]{10} = 1{,}6$	5
R10	$\varphi_{10} = \sqrt[10]{10} = 1{,}25$	10
R20	$\varphi_{20} = \sqrt[20]{10} = 1{,}12$	20
R40	$\varphi_{40} = \sqrt[40]{10} = 1{,}06$	40

Каждый ряд построен на знаменателе прогрессии φ_5, φ_{10}, φ_{20}, φ_{40} в интервале от 1 до 10. Числа свыше 10 получаются умножением на 10, 100, 1000 и т. д., а числа меньшие 1 — умножением на 0,1; 0,01; 0,0001 и т. д.

По предпочтительным числам и геометрическим рядам предпочтительных чисел построен ряд номинальных мощностей электрических машин и трансформаторов (ГОСТ 12139—84). Шкала регламентированных мощностей приведена в приложении 6. В стандартах на электрические машины устанавливаются размеры, технические требования, методы испытаний, номинальные напряжения в вольтах, частота вращения (синхронная) в оборотах в минуту и мощности в киловаттах или ваттах.

Размеры электрических машин, определяющие возможность их монтажа и сочленения с рабочими механизмами (высота оси вращения, диаметры концов валов), устанавливаются в соответствии с ГОСТ 6636 «Номинальные линейные размеры». Этот ГОСТ устанавливает ряды линейных размеров в интервале от 0,001 до 20000 мм, которые применяются в машиностроении.

Высоты оси вращения и установочные размеры электрических машин приведены в приложении 6.

Развитие международных связей и значительное увеличение объема электротехнической продукции, которой обмениваются разные страны, обуславливают необходимость международной стандартизации. Основные цели международной стандартизации определены Постоянным техническим

комитетом Международной организации по стандартизации (СТАКО и ИСО). Международные стандарты ИСО и МЭК играют важную роль в создании новых серий электрических машин и ликвидации торговых барьеров между странами.

Основополагающие стандарты на электрические машины и стандарты, регулирующие общие для электротехники нормы и правила приведены в «Справочнике по электрическим машинам», том I [16].

1.5. НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Повышение надежности электрических машин – важная задача электротехнической промышленности. Увеличение срока службы и повышение надежности дают относительно больший народнохозяйственный эффект, чем снижение удельного расхода материалов при изготовлении электрических машин [6].

Согласно ГОСТ 27.002 – 89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» надежность определяется, как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Для объектов в зависимости от назначения применяют различные показатели надежности. Различают восстанавливаемые и невосстанавливаемые объекты. Если нормативно-технической и конструкторской документацией предусмотрено проведение ремонта объекта, то он называется ремонтируемым. Неремонтируемые объекты работают до первого отказа, после чего их снимают с эксплуатации. Значительное число электрических машин малой мощности относятся к неремонтируемым объектам. Для различных видов электрических машин и условий эксплуатации основные понятия теории надежности – безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость – имеют различную относительную значимость. Для неремонтируемых электрических машин основным показателем является безотказность. Для остальных машин большое значение имеет ремонтопригодность.

Безотказность — это свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки. Долговечность — свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта. Ремонтопригодность — свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта. Сохраняемость — свойство объекта сохранять в

заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции в течение и после хранения и транспортирования.

Отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. При оценке надежности электрических машин необходимо заранее оговорить, какое состояние считается неработоспособным. По характеру возникновения различают отказы внезапные, характеризующиеся скачкообразным изменением значений одного или нескольких параметров объекта, и отказы постепенные, характеризующиеся постепенным изменением значений одного или нескольких параметров объекта. Внезапные отказы обычно проявляются в виде повреждений элементов (обрывы, пробои изоляции, образование трещин, поломки). Постепенные отказы связаны с износом и старением элементов и материалов (износ щеток и коллектора, старение изоляции).

По условиям создания и работы объектов различают конструкционные, производственные и эксплуатационные отказы. Они характеризуют основные причины их возникновения: при конструировании — несовершенство или нарушение установленных норм и правил конструирования и проектирования, при производстве — нарушение или несовершенство установленного процесса изготовления или ремонта, при эксплуатации — нарушение установленных правил и условий эксплуатации.

Для оценки надежности неремонтируемых электрических машин используют вероятностную характеристику случайной величины — наработку до отказа T, под которой понимают наработку объекта от начала эксплуатации до возникновения первого отказа.

Распределение наработки до отказа может быть описано вероятностью безотказной работы $P(t)$, плотностью распределения наработки до отказа $f(t)$ и интенсивностью отказов $\lambda(t)$. Вероятностью безотказной работы $P(t)$ называют вероятность того, что величина T наработка до отказа — будет не меньше заданной:

$$P(t) = P\{T >> t\}. \tag{1.5}$$

Во многих задачах требуется определить вероятность безотказной работы объекта за время t — вероятность того, что в пределах заданной наработки не возникает отказа объекта, т. е. вероятность $P(t_1,t_2)$ безотказной работы в интервале наработки (t_1,t_2). Она равна отношению вероятностей безотказной работы в начале и в конце интервала:

$$P(t_1,t_2) = P(t_2)/P(t_1). \tag{1.6}$$

Статистически вероятность безотказной работы определяется отношением числа объектов, безотказно проработавших до момента t, к числу объектов

работоспособных в начальный момент времени:

$$P(t) = [N - n(t)]/N, \tag{1.7}$$

где N — число объектов в момент начала наблюдений или испытаний; $n(t)$ — число объектов, отказавших за время t.

Вероятность отказа объекта

$$Q(t) = 1 - P(t). \tag{1.8}$$

Надежность ряда ремонтируемых объектов не всегда удобно характеризовать вероятностью безотказной работы, так как $P(t)$ у них весьма близка к единице, особенно для небольших интервалов наработки, поэтому используется другой показатель надежности — плотность распределения наработки до отказа:

$$f(t) = dQ(t)/dt = -dP(t)/dt, \tag{1.9}$$

где

$$P(t) = -\int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt; \tag{1.10}$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt. \tag{1.11}$$

Для неремонтируемых объектов используется другой показатель — интенсивность отказов $\lambda(t)$. Интенсивность отказов — условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник:

$$\lambda(t) = f(t)/P(t), \tag{1.12}$$

где

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \tag{1.13}$$

При $\lambda(t) = \lambda = const P(t) = e^{-\lambda t}$.

Статистически интенсивность отказов определяют следующим образом:

$$\lambda(t) = n(\Delta t)/(N_{cp}\Delta t), \tag{1.14}$$

где $N_{ср} = (N_i + N_{i+1})/2$ — среднее число объектов, исправно работающих в интервале Δt; N_i — число работоспособных объектов в начале интервала Δt; N_{i+1} — число работоспособных объектов в конце интервала Δt; n — число отказавших объектов в интервале Δt.

Одним из показателей безотказности является средняя наработка до отказа — математическое ожидание наработки объекта до первого отказа:

$$M[T] = \int_0^\infty tf(t)dt = \int_0^\infty P(t)dt. \qquad (1.15)$$

На практике используется следующая оценка средней наработки до отказа:

$$T = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} t_i , \qquad (1.16)$$

где t_i — наработка до отказа i-го объекта; N число объектов.

Для восстанавливаемых объектов пользуются средней наработкой на отказ – отношением суммарной наработки восстанавливаемого объекта к математическому ожиданию числа его отказов в течение этой наработки.

Наиболее распространенными показателями долговечности электрических машин являются средний ресурс и средний срок службы. Средний ресурс – математическое ожидание ресурса. Ресурс – это суммарная наработка объекта от начала его эксплуатации или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние. Средний срок службы – математическое ожидание срока службы. Срок службы – календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до перехода в предельное состояние.

Для характеристики нескольких свойств надежности объектов используют комплексные показатели надежности. Среди них большое значение имеет коэффициент готовности:

$$k_г = T_о /(T_о + T_в), \qquad (1.17)$$

где $T_о$ – средняя наработка на отказ; $T_в$ - среднее время восстановления.

При рассмотрении работоспособности электрических машин наблюдаются характерные периоды, отражающие главные причины их отказов (рис. 1.8).

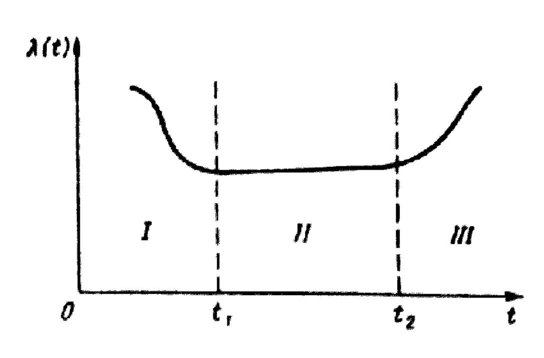


Рис. 1.8. Интенсивность отказов

Период I – это период приработки, когда при испытаниях или начальной стадии эксплуатации происходят выявление и отбраковка конструктивных и производственных недостатков. Для предотвращения отказов в эксплуатации в период приработки производят замену дефектных деталей исправными и, если это возможно, приработку отдельных узлов. Для электрических

машин производится проверка изоляции обмоток, притирка щеток на коллекторе или контактных кольцах, настройка систем регулирования и возбуждения, наладка подшипниковых узлов. Для ответственных электрических машин период приработки происходит непосредственно на заводе-изготовителе, чтобы избежать отказов в эксплуатации, обусловленные производственными причинами [19].

В большинстве случаев в период приработки вероятность безотказной работы может быть описана законом Вейбулла

$$P(t) = e^{-t_m / t_o}, \tag{1.18}$$

где $P(t)$ - вероятность безотказной работы за время t; t_m, t_0 - параметры.

После периода приработки начинается период нормальной эксплуатации II, когда интенсивность отказов падает и в течение длительного времени остается примерно постоянной (см. рис. 1.8). В этот период происходят внезапные отказы, т. е. может иметь место случайное повышение нагрузок. Распределение наработки до отказа описывается показательным законом, при этом функция плотности распределения

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t). \tag{1.19}$$

Вероятность безотказной работы

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \tag{1.20}$$

При постоянной величине интенсивности отказов средняя наработка до отказа

$$T = 1/\lambda. \tag{1.21}$$

Период работы электрической машины III характеризуется увеличением интенсивности отказов (см. рис. 1.8). С момента времени t_2 элементы и узлы машины начинают отказывать чаще, что вызвано их старением и износом. У электрических машин в этот период отмечается существенное нарушение свойств изоляции, уменьшение ее электрической прочности, износ тел качения подшипников, изменение структуры смазки, износ коллектора и изменение структуры материала коллекторных пластин, повышение вибраций и т. д.

Распределение наработки до отказа по причине изнашивания и старения описывают с помощью нормального закона. Так как наработка до отказа является случайной величиной, которая может принимать только положительные значения, то распределение T может быть усеченонормальным. Оно получается из нормального при ограничении интервала возможных значений этой величины.

Плотность усеченного нормального распределения определяется из выражения

$$\bar{f} = cf(t), \tag{1.22}$$

где c — нормирующий множитель; $f(t)$ — функция нормального распределения наработки до отказа:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{\frac{(t-m_t)^2}{2\sigma^2}}, \tag{1.23}$$

где m_t — математическое ожидание; σ — среднеквадратичное отклонение.

Величина c в (1.22) определяется с помощью нормированной функции Лапласа $\Phi(U)$:

$$c = 1/\left[\Phi(U_2) - \Phi(U_1)\right], \tag{1.24}$$

где

$$U_1 = (t_1 - m_t)/\sigma; \quad U_2 = (t_2 - m_t)/\sigma;$$

t_1, t_2 — интервалы ограничения средней наработки до отказа.

Практика эксплуатации электрических машин позволила наиболее полно исследовать статистическими методами надежность асинхронных двигателей. Систематическое наблюдение двигателей от начала эксплуатаций до капитального ремонта показало, что капитальному ремонту подвергаются 20% двигателей. При относительной простоте конструкции надежность асинхронных двигателей все еще остается низкой: средней срок службы составляет 20 тыс. ч (5 лет) и колеблется в зависимости от области применения — от 60 тыс. ч (в химической промышленности) до 6 тыс. ч (в горнодобывающей промышленности).

Основными причинами выхода из строя асинхронных двигателей являются их неправильная эксплуатация, несовершенная защита или ее отсутствие. При защите плавкими предохранителями двигатели отказывают из-за работы на двух фазах. Данные эксплуатации показывают, что 80% аварий от работы на двух фазах происходят из-за отсутствия тепловой защиты и 20% — из-за неисправности, а 15% двигателей отказывают также из-за несоответствия конструктивного исполнения условиям эксплуатации. Наблюдаются также отказы двигателей, обусловленные неправильным выбором двигателей по мощности.

Иногда превышение температуры двигателей вызываются неравномерностью воздушного зазора, что приводит к задеванию ротора о статор машины. Это может быть обусловлено тем, что технологический процесс и состояние оборудования не обеспечивают требуемую обработку станин, подшипниковых узлов и пакетов ротора. Неравномерность

воздушного зазора может быть вызвана и прогибом вала в случае его недостаточной жесткости. Причиной отказа обмоток двигателей нередко является низкое качество изоляции обмоточных проводов и пропитывающих лаков. Преждевременные отказы обмоток вызываются часто несовершенными технологическими процессами, некачественной пропиткой, намоткой и укладкой в пазы витков обмотки статора. Основные причины отказов можно количественно охарактеризовать следующим образом: неправильное применение — 15…35%, недостатки эксплуатации 25…50%, недостатки конструкции и технологии 30…35%. Лишь 10…12% двигателей выходят из строя вследствие процессов износа и старения.

В подавляющем большинстве случаев отказы двигателей происходят из-за повреждения обмоток 85…95%, 2…5% двигателей отказывают из-за повреждений подшипников. Основные отказы обмоток приходятся на межвитковые замыкания 93%, пробой изоляции 2%, пробой межфазной изоляции 5%. Это распределение показывает, что основное внимание в асинхронных двигателях со всыпной обмоткой должно быть уделено межвитковой изоляции.

Для межвитковой изоляции разработана математическая модель надежности. Элементами модели являются два витка, расположенных рядом в пазу или лобовой части и разделенных межвитковой изоляции, состоящей из собственной изоляции обмоточного провода, пропиточного лака и воздушных прослоек. Для безотказной работы обмотки необходима исправность всех ее составляющих элементов. Отказ происходит тогда, когда приложенное напряжение к соседним виткам превышает пробивное напряжение межвитковой изоляции.

Вероятность безотказной работы межвитковой изоляции обмотки, состоящей из n пар проводников, равна:

$$P_{\text{В}} = \int_0^{\infty} q(U_{\text{В}})\left[1 - F(U_{\text{В}})\right]^n dU_{\text{В}}, \qquad (1.25)$$

где $q(U_{\text{В}})$ — плотность распределения приложенных напряжений; $F(U_{\text{В}})$ — функция распределения пробивного напряжения межвитковой изоляции.

Распределение приложенного напряжения между витками зависят от напряжения на фазе, числа последовательно соединенных секций в фазе, кратности и распределения коммутационных напряжений вдоль обмотки и числа проводников в пазу. Пробивное напряжение изоляции обмоток зависит от свойств изоляционных материалов и условий эксплуатации.

Синхронные машины являются, в основном, крупными электрическими машинами, изготовляемыми мелкими сериями, что затрудняет обработку

статистических данных. Синхронные машины являются ремонтируемыми объектами, поэтому для таких машин важны, как показатели надежности коэффициент готовности и среднее время восстановления. Синхронные машины отличаются тем, что имеют относительно высокое качество обслуживания; количество отказов по причинам, связанным с ошибками персонала, соизмеримо с количеством отказов из-за дефектов изготовления. Вместе с тем в процессе эксплуатации обычно происходят доводка, усовершенствование, модернизация машины. Статистические данные свидетельствуют о том, что одной из основных причин отказов синхронных машин являются заводские дефекты. Число аварийных отключений, вызванных дефектами изготовления, значительно больше вызванных недостатками конструкции. В течение первого периода работы (5… 10 тыс. ч) имеет место приработка, когда заменяют и ремонтируют детали с заводскими дефектами. Период нормальной эксплуатации составляет 15…20 лет, после чего начинаются отказы, связанные с износом и старением материалов и элементов конструкции.

Для оценки эксплуатационной надежности синхронных генераторов широко применяют такой показатель, как удельная повреждаемость — удельное число аварийных отключений, которое измеряется средним числом повреждений на одну машину в год, выраженное в процентах. Установлено, что повреждаемость, вызванная заводскими недостатками, составляет для турбогенераторов 3,5%, для гидрогенераторов 4%. Удельная повреждаемость возрастает с ростом мощности.

Большинство повреждений относятся к обмотке статора. Основным местом повреждений изоляции обмоток статора является пазовая часть обмотки, пробой которой составляет примерно 50% всех пробоев обмоток статора. На процесс изменения и разрушения изоляции оказывает влияние возрастание нагрузок: повышенные механические усилия при переходных процессах, вибрации, перенапряжения, перегрузки по току. В процессе изготовления могут появиться участки с пониженной электрической прочностью. Это связано с изготовлением стержней обмоток с размерами, выходящими за пределы допуска, что приводит к повреждению изоляции при укладке обмотки в пазы. В процессе изготовления возможно попадание на поверхность изоляции ферромагнитных частиц, вибрация которых в магнитном поле приводит к постепенному разрушению изоляции. Вследствие поломки листов статора создаются условия повреждения изоляции стержней.

Надежность изоляции лобовых частей во многом определяется способом их крепления. Лобовые части обмоток крупных электрических машин наибольшей опасности подвергаются при переходных процессах, при этом возможны разрывы бандажей, деформация частей обмотки, появление

трещин и вмятин в изоляции. В процессе эксплуатации синхронных генераторов отмечаются также пробои изоляции вследствие попадания масла и влаги. Среди повреждений активной стали, наиболее частыми являются ослабление запрессовки, расшатывание сердечника стали под действием вибрационных и магнитных сил, повреждение изоляционной пленки на поверхности листов.

На подвижных частях машины частые повреждения возникают на бандажных узлах. Они вызываются действием центробежных сил, деформациями вала и усилиями горячих посадок на вал. Под действием температуры происходят перемещение обмотки ротора, деформация проводников обмотки. Возможно также перекрытие каналов охлаждения и снижения сопротивления изоляции при попадании влаги, масла и пыли на обмотку.

Характерными повреждениями и нарушениями в работе подшипниковых узлов крупных синхронных машин являются: выплавление баббита, повреждение вкладышей и цапф подшипниковыми токами. Выплавление баббита обычно происходит при нарушении работы систем маслоснабжения. Наиболее распространенной неисправностью подшипников является вытекание масла. Подшипниковые токи возникают из-за несимметрии в магнитной системе, обусловленной неравномерным зазором, наличием осевых каналов, несимметричным размещением сегментов активной стали. Замыкание обмотки ротора на корпус также приводит к появлению подшипниковых токов. Это явление сопровождается повреждением поверхностей вкладышей и шеек вала вследствие эрозии под воздействием разрывов.

Для обеспечения надежности крупных синхронных машин большое внимание уделяется контактно-щеточной системе и возбудителям. Число отказов возбудителей иногда превышает число отказов обмоток ротора и статора.

Статистическая обработка эксплуатационных данных показывает, что неравномерное токораспределение вызывает большой разброс скорости изнашивания щеток. Это вызвано многими причинами, среди которых важнейшими являются характеристики и конструкция материалов скользящего контакта, плотность тока под щетками и соотношение электрических и механических потерь в контакте, вид вольт-амперных характеристик щеток. При эксплуатации генераторов износ щеток и контактных колец зависит также от величины вибрации колец, удельного давления на щетки, попадания масла на щетки и на контактную поверхность колец из опорных подшипников. При эксплуатации турбогенераторов возможно отделение втулки контактных колец от вала в месте ее посадки. Это вызывает резкое увеличение вибрации колец и общее ухудшение работы щеточного аппарата.

Для оценки надежности синхронных генераторов средней мощности (до 100 кВт) с достаточной полнотой использовались статистические методы. Установлено, что вероятность безотказной работы генераторов ЕС и ЕСС в период до 4 тыс. ч описывается законом распределения Вейбулла. В период 4…12 тыс. ч распределение отказов является экспоненциальным. Характеристика отказов этих машин имеет общие черты с отказами крупных генераторов и асинхронных двигателей. Основными узлами, подверженными отказам, являются обмотки ротора и статора, блок регулирования напряжения, подшипниковый узел. Установлено, что среднее время наработки на отказ для различных типов крупных машин составляет 3…5 тыс. ч, а среднее время ремонта 10…35 тыс. ч.

Данные о причинах выхода из строя в период эксплуатации электрических машин постоянного тока как общего, так и специального назначения показывают, что большинство аварий происходят по вине обслуживающего персонала, который не всегда обеспечивает необходимый уход и качественное выполнение текущего ремонта. Среди других причин отказов следует отменить конструкционные недостатки и условия эксплуатации.

Наиболее частыми повреждениями возбудителей синхронных генераторов являются повреждения бандажей обмотки якоря, нарушения пайки петушков и износ коллектора, при этом надежность коллекторно-щеточного узла во много зависит от мощности возбудителя.

В тяговых двигателях электровозов одной из частых причин отказов в работе является возникновение кругового огня на коллекторе. Это вызвано условиями эксплуатации (буксование колесных пар электровозов), невысоким качеством выпрямительного питающего напряжения, повышенными ударами и вибрационными нагрузками.

Для электрических машин постоянного тока общего назначения характерным повреждением является также неисправность коллектора. По статистике выход из строя этих машин из-за повреждений коллектора составляет 20% общего числа отказов. Относительно большое число повреждений коллектора вызывается трением щеток. Скорость износа щеток не является величиной, одинаковой для всех щеток. Она зависит от следующих факторов: неправильной установки щеток, неисправностей щеткодержателей, попадания летучих фракций пропиточных лаков обмотки на коллектор, механических неисправностей коллектора, неправильного выбора марок и конструкции щеток. Механическая нестабильность скользящего контакта приводит также к разрушению щеток и арматуры.

Повреждения коллектора могут проявляться в нарушении цилиндричности поверхности коллектора из-за неравномерного ее износа и нарушений в механических узлах машины. На поверхности коллектора в процессе

эксплуатации происходит нарушение полировки из-за подгорания пластин и царапин и неравномерности нажатия отдельных щеток на коллектор. К механическим факторам, влияющим на износ коллектора, относятся давление щеток на коллектор, их вибрация и биение коллектора, высокая окружная скорость вращения. Износ коллектора зависит также от химических факторов, к которым относятся образование контактной пленки на поверхности коллектора, состав и влажность окружающей среды, наличие в среде активных веществ. Среди электрических факторов, влияющих на износ коллектора, следует отметить плотность тока под щетками, сопротивление переходных контактов щеток и коллектора, нарушение коммутации машины, которое приводит к появлению искрения под щетками.

Повреждение обмоток якорей машин постоянного тока проявляется в пробое корпусной изоляции между пакетом стали якоря и обмоткой и пробое изоляции между витками в якорях с многовитковыми секциями. В крупных машинах постоянного тока повреждения проявляется в распайке соединительных петушков коллекторных пластин с обмоткой и из-за разрушения проволочных бандажей.

Отказы механических узлов машин постоянного тока определяются, в основном, состоянием шеек вала и подшипников качения и скольжения. Повреждение подшипников скольжения и шее вала выражаются в виде износа вкладышей в гнездах подшипников, вытекания смазки из подшипников при их неисправностях, нарушения работы смазочных колец в подшипниках. Отказы подшипников качения происходят из-за вытекания смазки из подшипников, поломки шариков или роликов между обоймами подшипников, разрушение сепаратора, заклинивания шариков в обоймах подшипников. Другим механическим узлом, который повреждается при эксплуатации электрических машин постоянного тока, является щеточная траверса. Повреждения этого узла проявляется в виде поломки кольца траверсы, закрепляющего ее на подшипниковом устройстве, расстройстве регулировки положения щеткодержателей на кольцах или бракетах траверсы.

Наряду со статистической обработкой данных эксплуатации для оценки надежности электрических машин используются также определительные и контрольные испытания. Определительные испытания проводят для определения сравнительных показателей надежности, контрольные — для контроля соответствия показателей требованиям стандартов или технических условий [8].

Для определительных испытаний объем выборки (количество машин, случайным образом отобранных из партии или серии, подлежащих испытаниям) составляет 20…30 машин. Испытания проводятся до отказа всех машин выборки, что позволяет построить кривую вероятности безотказной работы в функции наработки.

Контрольные испытания проводят либо для одного уровня (риск заказчика β), либо для двух (риск заказчика β и риск изготовителя α). Для соответствующих значений β и α определяется объемом выборки, необходимый для подтверждения требуемого значения вероятности безотказной работы. После испытания машин в случае, если число отказавших во время испытаний машин α не превышает некоторое число c — так называемого приемочного числа, требуемый уровень вероятности безотказной работы $P(t)$ подтверждается. В противном случае гипотеза о соответствии надежности партии машин требуемому уровню отклоняется.

Испытания на надежность, как определительные, так и контрольные, весьма длительные и дорогостоящие. Кроме того, данные испытаний зачастую запаздывают и не могут дать оперативной коррекции при конструировании и совершенствовании технологии. Сокращение времени испытаний решается проведением форсированных испытаний на надежность. В этом случае испытания электрических машин проводятся в специальных условиях, характеризующихся повышенным уровнем некоторых воздействующих факторов: температура окружающей среды, вибрации, номинальных частоты вращения и нагрузки, числа пусков, влажности, удельного нажатия и плотности тока под щеткой, запыленности.

Ускоренным испытаниям данного типа машин определенной мощности или диапазона мощностей предшествуют испытания по определению коэффициента ускорения. Коэффициент ускорения k_y есть отношение времени, в течение которого вероятность безотказной работы машины в номинальном режиме составляет $P(t)$, ко времени, в течение которого та же вероятность $P(t)$ будет в режиме форсировки. Необходимо соблюдение адекватности законов распределения в форсированном и нормальном режиме. Это, в свою очередь, означает, что при форсированных испытаниях не должна нарушаться физика старения и износа материалов и конструкции электрической машины. Количество факторов форсировки обычно варьируется от двух до четырех. Электрические машины могут быть испытаны с коэффициентом ускорения 10—15, что значительно сокращает время испытаний [8, 16].

1.6. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Проектирование электрических машин включает электромагнитные, тепловые, вентиляционные, механические и другие расчеты с одновременным выбором конструкции, удовлетворяющей технологическим требованиям ее изготовления при минимальных затратах материалов, большей надежности и меньшей стоимости. Все эти требования

противоречивы, и необходим расчет многих вариантов геометрии активной части и изменения конструкции машины.

Задание на курсовой проект содержит основные данные проектируемой машины, указания о режиме ее работы, конструктивном исполнении, в виде защиты от окружающей среды и системе вентиляции. Кроме того, могут быть заданы дополнительные требования, например диапазон регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока, наименьшие допустимые значения кратности пускового и максимального моментов асинхронных двигателей и т. п. Проектируемая машина должна удовлетворять соответствующим ГОСТ.

Наименование разделов курсового проекта и их примерный объем в процентах приведены в тал. 1.5. Отдельные разделы проекта должны быть выполнены и представлены для проверки руководителю в установленные сроки.

Таблица 1.5. **Основные разделы курсового проекта, их относительный объем**

Наименование разделов проектов	Объем раздела, %
Выбор главных размеров	5
Электромагнитный расчет	35
Разработка конструкции (выполнение чертежей общих видов в тонких линиях)	30
Механические расчеты	5
Вентиляционный расчет	5
Тепловой расчет	5
Экономический расчет	5
Завершение чертежей и оформление пояснительной записки	10

В табл. 1.5 объем разделов курсового проекта указан ориентировочно и при индивидуальном задании корректируется в зависимости от темы проекта.

В качестве основного пособия для проектирования электрических машин общего назначения может быть использована настоящая книга. Однако для полноты проработки материала необходимо использовать также и другие источники. Так, при разработке конструкции машины следует обратиться к заводским чертежам аналогичных машин, близких по габаритам к заданной в проектном задании, каталогам и справочникам на электрические машины [16]. Примеры общей компоновки машин и конструкции их отдельных узлов и деталей, технология изготовления основных деталей и сборки, конструкция изоляции и изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах различных назначений, рассмотрены в [2,16].

При работе над проектом следует использовать конструктивные исполнения, принятые в электрических машинах современных серий.

Расчеты машин проводят в последовательности, изложенной в соответствующих главах данной книги. Вначале выбирают главные размеры и выполняют электромагнитный расчет, в процессе которого определяют обмоточные данные и размеры машины. Электромагнитные расчеты заканчивают построением основных характеристик [6].

После электромагнитного расчета должны быть выполнены в тонких линиях чертежи машины. В процессе конструирования проверяются выбранные ранее размерные соотношения деталей и узлов.

Вентиляционный, тепловой и механические расчеты выполняют исходя из размеров, полученных в расчете и на чертеже. Содержание и объем этих расчетов определяются руководителем проекта в зависимости от требования технического задания.

Экономический расчет при учебном проектировании является заключительным. Его объем и методика проведения определяются кафедрой, ведущей проектирование. Вопросы экономики учитывают в течение всей работы над проектом.

К защите проекта представляются чертежи спроектированной машины и пояснительная записка.

Пояснительная записка должна содержать окончательные варианты расчетов всех разделов проекта. Если в процессе работы выявилась необходимость изменения каких-либо первоначально принятых размеров или рассчитанных данных, потребовавшая пересчета ряда позиций, то первоначальные варианты расчета в текст пояснительной записки не включаются. К принятому окончательному варианту необходимо сделать краткое пояснение.

В тексте записки необходимые по ходу расчета пояснения и обоснования следует излагать кратко и ясно. При записи расчетов нужно обязательно привести расчетную формулу в общем виде, затем ту же формулу с заменой символов соответствующими числами и, наконец, численный результат с указанием единицы полученной величины. Результаты промежуточных вычислений могут быть опущены. Все расчеты проводят в системе СИ.

Текст пояснительной записки должен сопровождаться достаточным количеством иллюстраций – эскизов, графиков, в полной мере поясняющих принятые в расчете обозначения размеров и полученные размерные соотношения. Все рисунки должны быть выполнены с точным соблюдением масштаба, что позволяет вовремя заметить возможные ошибки в расчете. Пояснительная записка выполняется на стандартных листах писчей бумаги формата 11. Текст пишется чернилами. Оборотная сторона листа не используется. Страницы записки необходимо пронумеровать, рисунки выполнить на отдельных листах чертежей или миллиметровой бумаге того же формата и сброшюровать вместе с текстом.

Графическая часть проекта обычно состоит из двух-трех листов чертежей формата 24. Она содержит чертежи общих видов машин с необходимыми для пояснения конструкции разрезами и нескольких деталей, поперечные размеры пазов с расположенными в них проводниками и изоляцией обмотки, схему обмотки и основные характеристики спроектированной машины. Объем и содержание графической части проекта корректируются в зависимости от требований технического задания и времени, отведенного в учебных планах на выполнение курсового проекта.

Глава вторая. **Материалы, применяемые в электромашиностроении.**

В настоящее время улучшение показателей машин общего назначения достигается, в основном, за счет повышения качества материалов, применяемых при их изготовлении. Используемые в электромашиностроении материалы делят на магнитные, из которых изготовляются магнитопроводы, проводниковые, из которых выполняются обмотки, изоляционные и конструкционные. Магнитные и проводниковые материалы принято относить к активным. Деление на активные и конструкционные материалы условно, так как часто функции материалов совмещаются. Магнитные, проводниковые, изоляционные и конструкционные материалы обеспечивают распределение электромагнитных и тепловых полей в электрической машине, при котором осуществляется оптимальное электромеханическое преобразование энергии.

2.1. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.

Для изготовления магнитопроводов электрических машин применяются листовая электротехническая сталь, стальное литье, листовая сталь, чугун и магнитодиэлектрики.

Тонколистовая электротехническая сталь по ГОСТ 21427.0–75 разделяется на 38 марок. Она изготовляется в виде рулонов, листов и резаной ленты.

Обозначения марок стали состоят из четырех цифр. Первая обозначает класс по структурному состоянию и виду прокатки, вторая – примерное содержание кремния, третья – группу по основной нормируемой характеристике. Эти три первые цифры в обозначении марки означают тип стали, а четвертая – порядковый номер типа стали.

Сталь подразделяют по структурному состоянию и виду прокатки на 3 класса: 1 – горячекатаную изотропную, 2 - холоднокатаную изотропную, 3 - холоднокатаную анизотропную с ребровой текстурой.

По содержанию кремния сталь подразделяют на 6 групп: 0 – с содержанием кремния, равным 0,4% включительно (нелегированная); 1 – с содержанием кремния, равным 0,4…0,8%; 2 – с содержанием кремния, равным 0,8…1,8% ; 3 – 1,8…2,8%; 4 – 2,8…3,8%; 5 – 3,4…4,8%.

По ГОСТ 21427.0 – 75 химический состав стали не нормируют.

По основной нормируемой характеристике стали делят на 5 групп: 0 – удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1,7/50}$); 1 – удельные потери при магнитной индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц ($p_{1,5/50}$); 2 – удельные потери при магнитной индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц ($p_{1,0/400}$); 6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$); 7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (B_{10}).

Свойства стали зависят от содержания кремния и условий ее изготовления. Сталь с низким содержанием кремния имеет меньшую относительную магнитную проницаемость и большие магнитные потери, а также большую индукцию насыщения. Стали с высоким содержанием кремния имеют меньшие потери на вихревые токи и гистерезис и высокую относительную магнитную проницаемость в слабых и средних полях. Содержание кремния снижает плотность и повышает удельное электрическое сопротивление стали. Для стали с содержанием кремния 0,8…1,8% плотность составляет 7800 кг/м^3 , удельное сопротивление $0{,}25 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Для стали с содержанием кремния 3,8…4,8% плотность составляет 7550 кг/м^3, удельное сопротивление $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

В электротехнической промышленности широко применяют анизотропные холоднокатаные стали, имеющие в направлении проката более высокую проницаемость и меньшие потери в слабых полях, чем горячекатаные стали. В анизотропных сталях магнитные свойства вдоль прокатки и в направлении, перпендикулярном прокатке, - различные.

Созданы изотропные холоднокатаные стали с кубической текстурой, имеющие высокие магнитные качества как в направлении проката, так и в перпендикулярном направлении.

Горячекатаная изотропная тонколистовая электротехническая сталь изготовляется в виде листов следующих марок: 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1313, 1411, 1412, 1413, 1511, 1512, 1513, 1514, 1521, 1561, 1562, 1571 и 1572.

По точности прокатки по толщине сталь подразделяют на сталь нормальной (Н) и повышенной (П) точности.

На электротехнические заводы листы стали поставляются в термически обработанном состоянии. По состоянию поверхности сталь выпускается с травленой (Т) и с нетравленой (НТ) поверхностью. Поверхность листов должна быть гладкой, без ржавчины, отслаивающей окалины, налета порошкообразных веществ, препятствующих нанесению изоляции.

Пример условного обозначения листа толщиной 0,5 мм, шириной 1000 мм, длиной 2000 мм, повышенной точности прокатки, класса неплоскостности 2, с травленой поверхностью, из стали марки 1512: лист 0,50х1000х2000-П-2-Т-1512.

На электротехническую холоднокатаную анизотропную тонколистовую сталь, изготовляемую в виде рулонов, листов и резаной ленты, распространяется ГОСТ 21427.1 – 83, соответствующий стандарту СТ СЭВ 102-85. Эта сталь выпускается следующих марок: 3311, 3412, 3413, 3414, 3415, 3416, 3404, 3405 и 3406.

По точности прокатки и неплоскостности сталь классифицируют так же, как и горячекатаная, по виду покрытия: с электроизоляционным термостойким покрытием (ЭТ), с покрытием, не ухудшающим штампуемость (М), мягкое, без электроизоляционного покрытия (БП).

Рулонную сталь изготовляют толщиной 0,28; 0,30; 0,35 и 0,50 мм и шириной 750, 860 и 1000 мм. Резаную ленту изготовляют толщиной 0,28; 0,30; 0,35; 0,50 мм, шириной 170, 180, 190, 200, 240, 250, 300, 325, 360, 400, 465 и 500 мм. Предельные отклонения по толщине стали, по ширине рулона и ленты, неплоскостность оговариваются ГОСТ. Сталь поставляется в термически обработанном состоянии. Сталь толщиной 0,28; 0,30 и 0,35 мм изготовляют с электроизоляционным термостойким покрытием, а сталь толщиной 0,50 мм – без электроизоляционного термостойкого покрытия или с покрытием, не ухудшающим штампуемость. Магнитные свойства стали приведены в приложении 1.

Тонколистовая холоднокатаная изотропная электротехническая сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты следующих марок: 2011, 2012, 2013, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2312, 2411 и 2412 (ГОСТ 21427.2-83).

По точности прокатки, неплоскостности, коэффициенту заполнения подразделения те же, что и у анизотропной стали. По типу покрытия эти стали выпускаются с термостойким электроизоляционным покрытием (ЭТ), с нетермостойким (Э) и без покрытия (БП). Изотропную рулонную сталь изготовляют толщиной 0,35; 0,50; 0,65 мм и шириной 500, 530, 600, 670, 750, 850 и 1000 мм.

Магнитные свойства сталей характеризуют кривые намагничивания, приведенные в приложении 2. Потери в стали от вихревых токов и гистерезиса определяются удельными потерями, т. е. потерями в 1 кг стали при частоте 50 Гц и синусоидальном напряжении.

Магнитные характеристики сталей, приведенные в приложении 1, сняты на образцах на аппарате Эпштейна. Геометрия листов стали, механическая обработка искажают свойства электротехнической стали. Поэтому магнитные характеристики сталей в магнитопроводах электрических машин учитываются технологическими коэффициентами, которые определяются обычно опытным путем и учитывают конструкцию и технологию изготовления.

Для уменьшения потерь от вихревых токов листы стали изолируют лаком и выпускают с термостойким покрытием. Изоляционные прослойки уменьшают активное сечение пакета стали, что учитывается коэффициентом

заполнения пакета сталью k_c. Он характеризует отношение сечения стали (без изоляции) ко всему сечению пакета. В табл. 2.1 приведены усредненные значения k_c в зависимости от изоляции и толщины листов, так как k_c зависит от степени прессовки листов и длины пакетов.

Таблица 2.1. **Коэффициент заполнения пакета сталью k_c.**

Толщина листа, мм	Изоляция листов	
	оксидированных	лакированных
1	0,98	0,97
0,5	0,95	0,93
0,35	0,93	0,91
0,3	0,92	0,89
0,28	0,91	0,88

Роторы короткозамкнутых асинхронных машин с заливкой пазов алюминием собирают из неизолированных листов. В этом случае k_c берется равным 0,95.

Для магнитопроводов, работающих в постоянных магнитных полях, применяются: техническое железо с содержанием углерода менее 0,04%, а также углеродистые стали и чугуны.

Для изготовления небольших магнитопроводов используются магнитодиэлектрики – материалы, имеющие высокие магнитные свойства и высокое электрическое сопротивление.

Листовая сталь 1211 толщиной 0,5 или 1 мм применяется для изготовления главных полюсов машин постоянного тока. Для полюсов синхронных машин используются стали толщиной 1…2 мм и более. Это ведет к улучшению k_c, который в этом случае составляет 0,95…0,98.

Листовая сталь применяется для сварных станин машин постоянного тока и изготовления ободов роторов синхронных машин. Толщина листовой стали колеблется от 1,5 до 12 мм. Магнитные свойства такие же, как и у литой стали.

Стальное литье используется для изготовления станин и роторов синхронных машин. Магнитные характеристики углеродистой стали приведены в приложении 1. Кованые стали находят применение при изготовлении роторов синхронных машин и добавочных полюсов машин постоянного тока. Чугун в последнее время в электромашиностроении используется все реже из-за плохих магнитных свойств.

2.2. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К проводниковым материалам, применяемым в электромашиностроении, относятся медь и алюминий. Серебро, имеющее удельное сопротивление, на 4 % меньшее по сравнению с медью, относится к дефицитным материалам и почти не применяется при изготовлении электрических машин.

Почти все изделия из меди для электротехнической промышленности изготовляются путем проката, прессования и волочения. Волочение применяют для производства проводов диаметром до 0,005 мм, ленты толщиной до 0,1 мм и фольги толщиной до 0,008 мм. При механических деформациях медь подвергается наклепу, который может быть устранен термообработкой [12].

В соответствии с ГОСТ 859 медь по химическому составу делится на девять марок: М1, М00к, М0ку, М0к, М00б, М0б, М1б, М1к, М1у. Цифры 0, 00, 1 определяют содержание меди, наибольшее содержание меди имеют марки М00к и М00б.

Индексы при марках имеют следующие значения: к, ку – катодная медь, б – бескислородная, у – катодная переплавленная. Примеси оказывают неблагоприятное влияние на механические и электрические свойства меди, поэтому медь с содержанием примесей выше 0,1 % для изготовления проводов не используется.

Для производства коллекторов машин постоянного тока применяется твердотянутая медь с присадкой кадмия. Кадмий увеличивает механическую прочность меди и благоприятно сказывается на качестве пленки на поверхности пластин, улучшая коммутацию.

Высокая электрическая проводимость обеспечивает широкое применение алюминия в электротехнической промышленности. Важными свойствами алюминия являются его малая плотность, низкая температура плавления, высокая пластичность, прочная и очень тонкая оксидная пленка, защищающая алюминий от коррозии. Алюминий хорошо обрабатывается давлением, и из него получаются листы, проволока, тончайшая фольга и штампованные детали. Плотность алюминия в 3,3 раза ниже, а удельное сопротивление лишь в 1,7 раза выше, чем у меди. Поэтому на единицу массы алюминий имеет вдвое более высокую проводимость, чем медь.

Алюминиевые провода с буквой А в обозначении изготовляют из алюминия марки АЕ, имеющего в своем составе 99,5 % чистого алюминия и 0,5 % примесей железа и кремния [12].

Для литейных сплавов наиболее употребительны сплавы АЛ2 и АЛ9.

Для заливки роторов асинхронных двигателей применяются сплавы, технические данные которых приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 **Алюминиевые сплавы для заливки роторов асинхронных двигателей**

Марка сплава	Удельная проводимость при 20^0 С, МОм/м	Средняя линейная усадка, %	Характеристика литейно-технологических свойств
Алюминий чистый	32	1,8	Ограниченные литейные свойства и жидкотекучесть
АК3	25		
АКМ-2-1	25	—	Чувствительны к образованию горячих трещин. Рекомендуются для заливки роторов с тонкими стержнями
АКМ4-4	19	—	
АК10	19		Высокие литейные свойства и жидкотекучесть до 800^0 С. Пригодны для любых роторов, особенно с тонкими стержнями
АКМц0-2	15	1,3	
АКМ12-4	15	1,3	Равноценен АК10. Из-за концентрированной усадки нежелательно применять для роторов с толстыми стержнями
АМ-7	19	1,3	Невысокие литейные свойства, подвержен окислению при заливки. Применяется для специальных роторов
АКЦ11-12	12	1,3	Высокие литейные свойства. Пригоден для заливки любых роторов

Сплавы, указанные в табл. 2.2, применяются при литье под давлением и центробежной заливке, сплавы АК3, АКМ4-4 и АМг7 – только при литье под давлением. Температура плавления составляет 640…740^0 С.

Латунь (сплав меди с цинком) и бронзой (сплав меди с кадмием, бериллием и фосфором) применяются для изготовления короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей и демпферных обмоток синхронных машин. Они хорошо обрабатываются, имеют малую усадку и используются также для изготовления токоведущих деталей сложной формы.

В целях экономии меди контактные кольца асинхронных машин с фазным ротором выполняются из стали или чугуна. Из стали выполняются и роторы специальных асинхронных двигателей, но двигатели с массивным ротором применяются редко. В этом случае имеет место совмещение магнитных и проводниковых функций материалов.

В настоящее время обосновывается применение стальных проводов вместо медных в пусковых обмотках однофазных двигателей и измерительных цепях других электротехнических устройств.

При низких температурах, близких к абсолютному нулю, медь становится плохим проводником. В сверхпроводящих и криорезистивных проводах применяется сплав ниобия с титаном. Сверхпроводящая проволока имеет

медное стабилизирующее покрытие, способствующее переходу сверхпроводника в нормальное состояние при резких изменениях магнитного потока. В последнее время выпускаются сверхпроводники, состоящие из транспортированных жил диаметром 1…10 мкм, число жил в медной матрице достигает сотен и тысяч.

Проводниковые материалы должны надежно использоваться в электрических машинах, работающих при 600^0 С и выше. При температуре выше 225^0 С медь начинает интенсивно окисляться, что приводит к резкому увеличению сопротивления и снижению эластичности. Чтобы защитить медную проволоку от окисления, наносится слой никеля. Биметаллическая проволока Cu—Ni для обмоточных проводов выпускается диаметром 0,1…2,5 мм.

При температуре 500…600^0 С основными материалами биметаллических проводников являются серебро—никель и медь—нержавеющая сталь. Применяют также триметаллические проводники: медь—железо—никель или медь—железо—никопель [12].

2.3. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Электроизоляционные материалы, или диэлектрики, применяются в электромашиностроении для изоляции частей электрической машины, находящихся под разными потенциалами.

Диэлектрики делятся на газообразные, жидкие и твердые. В электрических машинах применяют, в основном, твердые изоляционные материалы.

Толщина междувитковой и пазовой изоляции в большой степени определяет массогабаритные показатели машин. Нагревостойкость и теплопроводность изоляции определяют допустимые температуры частей машин и выбор электромагнитных нагрузок. Изоляция должна обладать необходимыми механическими свойствами и допускать механизацию и автоматизацию технологических процессов изготовления.

Изоляция во многом определяет надежность электрической машины. Срок службы электрической машины в нормальных условиях составляет 15…20 лет и зависит, главным образом, от срока службы изоляции.

При нагреве изоляции возникают процессы, приводящие к старению изоляции, т. е. к потере изолирующих свойств и механической прочности.

Нагревостойкость является одним из важнейших факторов, определяющих условия применения изоляции. Нагревостойкость — способность электроизоляционного материала выполнять свои функции при воздействии рабочей температуры в течение времени, сравнимого с расчетным сроком нормальной эксплуатации.

Согласно стандарту МЭК для определения нагревостойкости вводится характеристика, называемая температурным индексом (ТИ). Под температурным индексом понимается температура, при которой срок службы материала равен 20 тыс. ч.

Электроизоляционные материалы, применяемые в электромашиностроении, по нагревостойкости делятся на семь классов в соответствии с предельно допустимыми для них температурными (табл. 2.3).

Таблица 2.3. **Температурный индекс, нагревостойкость электроизоляционных материалов**

Температурный индекс	Класс нагревостойкости	Температура, ^{0}C	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости
90	Y	90	Непропитанные и непогруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка, шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
105	A	105	Пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка, шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
120	E	120	Некоторые синтетические органические пленки, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
130	B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
155	F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
180	H	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов
180 и выше	C	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов

Указанные в табл. 2.3 температуры соответствуют самому нагретому месту изоляции при номинальном режиме. С электроизоляционными материалами данного класса допускается совместное применение материалов предшествующих классов при условии, что комплексная изоляция не будет претерпевать изменений, которые могут сделать ее непригодной для длительной работы.

Ниже приводится ориентировочное распределение электроизоляционных материалов по классам нагревостойкости (температурному индексу).

К классу нагревостойкости изоляции Y (ТИ 90) относятся текстильные материалы на основе хлопка, натурального шелка, регенерированной целлюлозы, ацетилцеллюлозы и полиамидов. К этому классу относятся также целлюлозные электроизоляционные бумаги, картона и фибра, древесина, пластические массы с органическими накопителями.

Класс нагревостойкости изоляции А (ТИ 105) включает материалы класса нагревостойкости Y, если они пропитаны изоляционным составом или погружены в жидкие диэлектрики; ацетобутилатцеллюлозные, ацетилцеллюлозные и диацетатные пленки, пленкоэлектрокартон на основе ацетилцеллюлозной пленки; лакоткани, лакобумаги и лакочулки; изоляцию эмалированных проводов, слоистые пластики на основе целлюлозных бумаг и тканей, полиамидные литьевые смолы, асбестоцемент, пропитанный органическим составом, не вытекающим при 110^0 С, древесно-слоистые пластики, термореактивные компаунды на основе акриловых и метакриловых эфиров.

При производстве машин материалы класса нагревостойкости А могут пропитываться или покрываться лаками на основе натуральных смол, эфирцеллюлозными лаками и термопластичными компаундами.

В класс нагревостойкости изоляции Е (ТИ 120) входят пленки и волокна из полиэтилентерефталата, материалы на основе электроизоляционного картона и полиэтилентерефталатной пленки, стеклолакоткани и лакоткани на основе полиэтилентерефталатных волокон, термореактивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые).

К классу нагревостойкости изоляции В (ТИ 130) относятся материалы на основе щипанной слюды, слюдопластов и слюдинитов, включая с бумажной или органической подложкой, стеклоткани и стеклолакочулки, асбестовые волокнистые материалы, изоляции эмалированных проводов, пластмассы с неорганическим накопителем, слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов, термореактивные синтетические компаунды, асбоцемент.

В качестве пропитывающих и покровных составов при производстве для изоляции класса В применяют битумно-масляно-смоляные лаки и лаки на основе природных и синтетических смол.

Класс нагревостойкости изоляции F (ТИ 155) включает материалы на основе щипаной слюды, слюдинитов и слюдопластов без подложки или с неорганической подложкой, стекловолокнистую и асбестовую изоляцию проводов, стеклоткани и стеклолакочулки, слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов. При пропитке применяются соответствующие данному классу нагревостойкости лаки и смолы.

К классу нагревостойкости изоляции Н (ТИ 180) относятся материалы на основе слюды без подложки или с неорганической подложкой, стекловолокнистая изоляция проводов, стеклолакоткани и стеклолакочулки, слоистые пластики на основе стекловолокнистых и асбестовых материалов, пластические массы с неорганическим наполнителем, асбестоцемент, кремнийорганические эластомеры без подложек с неорганическими подложками, асбестовые пряжа, бумага и ткани.

При производстве материалов класса нагревостойкости Н для пропитки применяются кремнийорганические лаки и смолы.

К классу нагревостойкости изоляции С относятся слюда, стекло бесщелочное и стекловолокнистые материалы, электротехническая керамика, кварц, асбоцемент, шифер электротехнический, материалы из щипанной слюды без подложки или со стекловолокнистой подложкой, микалекс, политетрафторэтилен, полиимиды.

Приведенная выше классификация электроизоляционных материалов является ориентировочной и уточняется по мере накопления опытных данных.

Влагостойкие, тропические, химостойкие, холодностойкие и коррозионно-стойкие исполнения электрических машин предъявляют дополнительные требования к изоляции.

Выбор изоляции определяется заданием на проектирование и технологией, принятой заводом-изготовителем электрической машины.

Электротехнические бумаги и картоны получают из химически обработанных волокон древесины и хлопка, предназначены они для работы на воздухе и в масле. Электроизоляционные бумагу выпускают в рулонах, а картоны — в рулонах (до толщины 0,8 мм) и в листах (при толщине свыше 1 мм). Фибра — прессованная бумага, обработанная раствором хлористого цинка, поддается всем видам механической обработки и штамповки.

К слоистым электроизоляционным материалам относятся *гетинаксы, текстолиты и стеклотекстолиты.* В качестве связующих применяют бакелитовые и кремнийорганические смолы. В гетинаксах наполнителями являются специальные сорта бумаги, а хлопчатобумажные ткани используются в качестве наполнителей в текстолитах. Наполнителем в стеклотекстолитах являются бесщелочные стеклянные ткани. Наибольшей

нагревостойкостью и хорошими электрическими характеристиками обладают стеклотекстолиты на кремнийорганических связующих.

Гетинакс и текстолит всех марок работают длительно при температурах в диапазоне -60…+105^0 С, стеклотекстолит — от – 60 до +130^0 С, а стеклотекстолит марки СТК — от -60 до +180^0 С.

Лакоткани имеют тканевую основу, пропитанную лаком или другим жидким электроизоляционным составом. Лакоткани делятся на хлопчатобумажные, шелковые, капроновые и стеклянные (стеклолакоткани). Наибольшую гибкость и толщину имеют шелковые и капроновые лакоткани. Наименьшей гибкостью обладают стеклолакоткани. Жесткие лакоткани применяют для пазовой и межслоевой изоляции. Фторопластовые стеклолакоткани негорючи, химостойки и могут работать при 250^0 С. Липкие лакоткани обеспечивают монолитность многослойной изоляции обмоток. Лакоткани выпускают в рулонах шириной 500…1000 мм, липкие стеклоленты — в роликах диаметром 150…175 мм и шириной 10, 15, 20, 25 и 30 мм.

Перспективными электроизоляционными материалами являются *пленочные материалы* толщиной от 10 до 200 мкм. Они обеспечивают лучший коэффициент заполнения паза, что приводит к снижению массы на единицу мощности в электрических машинах. Данные пленочных электроизоляционных материалов приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4. **Пленочные электроизоляционные материалы**

Материал пленки	Плотность, кг/м^3	Нагревостойкость, ^{0} С	Относительное удлинение, %	Дополнительные данные
1	2	3	4	5
Полистирольные (стиропленки)	1050…1060	75…80	3,1…5,0	Растворяются в бензоле при комнатной температуре
Полиэтиленовые	920…930	65…75	250…500	Повышенная механическая прочность
Фторопласт-4	2100…2300	250	30…100	Не растворяется и не горит
Лавсан	1300…1400	120…130	70…100	Обладает большим сопротивлением надрыву
Фторопласт-3	2100…2400	100…120	40…80	Не горит. Растворяется в неполярных растворителях (бензин, четыреххлористый углерод и т. п.) при 100^0 С

1	2	3	4	5
Поливинилхлоридные	1400	65…75	10…120	Гибкие, стойкие к маслам, растворителям, озону
Триацетатцеллюлозные	1250	120	12…15	Повышенное влагопоглощение
Полиамидные (капрон)	1150	105	350…500	Большое сопротивление надрыву
Полиамидные	1420	220	70…80	Стойкость к ионизирующим излучениям

Клееные электроизоляционные материалы на основе слюды применяют в высоковольтных машинах, а также в низковольтных машинах с классом нагревостойкости изоляции Н. К таким материалам относятся *миканиты, микафолий* и *микаленты.*

Миканиты бывают коллекторные, прокладочные, формовочные и гибкие. Коллекторный миканит используют для изоляции между коллекторными пластинами. Прокладочный миканит — твердый листовой материал, применяемый для изготовления прокладок. Из формовочного миканита путем горячего прессования изготавливают коллекторные манжеты, корпуса, каркасы катушек и другие изделия фасонного профиля. Гибкий миканит — листовой материал, обладающий гибкостью при комнатной температуре, используют в качестве пазовой изоляции.

Микафолий состоит из слоев листочков щипаной слюды, склеенных друг с другом и с бумагой или со стеклотканью.

Микалента — рулонный электроизоляционный материал, гибкий при комнатной температуре. Микашелк — одна из разновидностей микаленты, имеющая повышенную механическую прочность. Повышенную нагревостойкость имеют стекломикаленты, широко применяют также стеклобандажные ленты.

Микалекс — неорганическая пластмасса на основе молотой слюды и легкоплавкого стекла, стойкая к дуге и имеющая хорошие механические свойства, выпускается в виде листов, пластин и прутков, применяется в конструктивных электроизоляционных механически нагруженных деталях (траверсы, распорки, щитки и т. д.).

Слюдиниты и слюдопласты широко применяются в качестве изоляционных материалов. Номенклатура слюдинитовых электроизоляционных материалов та же, что и материалов на основе щипаной слюды.

В слюдинитах основой являются слюдинитовые бумаги, которые изготавливаются из отходов слюды при равномерном ее нагреве до 700…800^0 С с последующей химической обработкой. Из слюдинитовых

бумаг производят слюдинитовые ленты, гибкие слюдиниты, формовочный и коллекторный слюдиниты.

Слюдинитовые материалы изготавливаются из листов, полученных из расщепленной слюды путем многократного прокатывания чешуек между валками. В процессе изготовления слюдопластовых листов чешуйки срастаются, образуя более крупные чешуйки слюды, чем в слюдините.

Слюдопластовые материалы выпускаются в том же ассортименте, что и слюдиниты.

Для пропитки обмоток электрических машин широко применяют пропиточные *компаунды* и *лаки*, которые обеспечивают цементацию витков, увеличивают коэффициент теплопроводности и повышают влагостойкость обмоток.

Покровные лаки обеспечивают влагостойкость, маслостойкость, защиту от агрессивных веществ обмоток и других частей электрических машин. По способу сушки лаки делятся на лаки печной и лаки воздушной сушки. Первые отвердевают при температуре 80…180^0 С, а вторые высыхают при комнатной температуре.

В электромашиностроении в качестве изоляционных материалов применяются материалы на основе натурального и искусственного каучуков. В зависимости от содержания серы получают мягкую резину (1…3% серы) и твердую резину — эбонит (30…35% серы).

Хорошими электроизоляционными свойствами обладают *керамические материалы*. К неорганическим керамическим материалам относится фарфор, применяемый при изготовлении высоковольтных выводов электрических машин.

В качестве изоляции используются диэлектрические пленки. Наибольшее распространение получили оксидные пленки из алюминия.

В качестве изоляционных и конструктивных материалов в электрических машинах широко применяются *пластмассы*. Многие пластмассы имеют высокую прочность и хорошие электроизоляционные свойства. При прессовании изделий из порошка можно получить электроизоляционные изделия сложной формы при сравнительно низкой трудоемкости [2,18].

2.4. ОБМОТОЧНЫЕ ПРОВОДА

Медные и алюминиевые обмоточные провода выпускают круглых прямоугольных сечений. Изоляция проводов определяет принадлежность проводов к тому или иному классу нагревостойкость (температурному индексу — ТИ) [12].

Круглые медные эмалированные провода широко применяют в электромашиностроении. Они имеют небольшую толщину изоляции, в 1,5…2,5 раза меньшую, чем провода, покрытые эмалью и хлопчатобумажной

или шелковой тканью. Это повышает теплопроводность и улучшает коэффициент заполнения паза.

Прямоугольные провода применяются в электрических машинах мощностью свыше 100 кВт, они дают лучшее заполнение прямоугольных пазов.

Прямоугольные провода имеют в обозначении буквы П. Ассортимент и размеры прямоугольных проводов приведены в приложении 3.

Свойства изоляции проводов определяются электроизоляционными лаками. Эмали и лаки имеют синтетическую или масляно-смоляную основу. Более 95% всех эмалированных проводов изготавливается с применением синтетических лаков, так как лаки на масляно-смоляной основе требуют при изготовлении растительные масла.

Для проводов класса нагревостойкости А (ТИ 105) применяются покрытия на основе поливинилацеталевых лаков.

Полиуретановые лаки применяются для эмалированных проводов класса нагревостойкости Е (ТИ 120).

Для производства эмалированных проводов классов нагревостойкости В, F и Н (ТИ 130, 155 и 180) используются лаки на полиэфирной, полиэфироимидной, полиэфирциануратимидной и полиэфирамидной основах. Эта группа лаков является в настоящее время основой при производстве эмалированных проводов [12,16].

В табл. 2.5 приведены основные данные медных эмалированных проводов, а в табл. 2.6 — их ассортимент и размеры.

Таблица 2.5. **Нагревостойкость, температурный индекс и конструктивные данные основных типов медных эмалированных проводов**

Марка провода	Температурный индекс	Класс нагрево-стойкости	Тип эмалевой изоляции	Номинальные размеры токопроводящей жилы, мм	Двусторонняя толщина изоляции, мм
1	2	3	4	5	6
ПЭЛ	105	А	Эмаль на масляно-смоляной основе	0,02…2,50	0,010…0,02
ПЭВ-1	105	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной основе	0,02…2,50	0,01…0,02 0,02…0,085
ПЭВ-2	105	А	То же, с утолщенной изоляцией	0,02…2,50	0,025…0,090
ПЭМ-1	105	А	Высокопрочная эмаль на поливинилацетатной (поливинилформалевой) основе	0,02…2,50	0,02…0,08
ПЭМ-2	105	А	То же, с утолщенной изоляцией	0,06…2,50 0,06…0,45	0,025…0,085 0,033…0,085
ПЭВТЛ-1	120	Е	Высокопрочная эмаль на полиуретановой основе	0,05…1,60	0,015…0,007

1	2	3	4	5	6
ПЭВТЛ-2	120	Е	То же, с утолщенной изоляцией	0,05…1,60	0,02…0,08
ПЭВТЛК	120	Е	Двойная эмаль на основе полиуретановых и полиамидных смол	0,05…1,60	0,03…0,05
ПЭВТ-1	130	В	Высокопрочная эмаль на полиэфирной основе (лак ПЭ-943)	0,063…2,50	0,025…0,09
ПЭТВ-2	130	В	То же (лак ПЭ-939)	0,063…2,50	0,025…0,09
ПЭТ-155 и ПЭТВ	155	F	Высокопрочная эмаль на полиэфироимидной основе	0,06…2,44	0,025…0,09
ПЭТ-200	200	С	Полиамидные лаки, обеспечивающие высокие механическую прочность и нагревостойкость	0,05…2,50	0,025…0,06

Основными типами высокопрочных эмалированных проводов являются провода ПЭВ-1 и ПЭВ-2, эмалированные винифлексовой изоляцией, и провода повышенной нагревостойкости ПЭТВ.

Круглые медные провода марок ПЭТВ-1 и ПЭТВ-2 являются основными проводами класса нагревостойкости В (ТИ 130).

Медные провода прямоугольного сечения ПЭТВП выпускаются сечениями 1,4…24,3 мм^2.

Для механизированной намотки электродвигателей единых серий применяются провода марки ПЭТВМ, имеющие большую толщину изоляции и лучшие механические свойства. Провода ПЭТВМ выпускаются в диапазоне диаметров 0,25…1,40 мм. Несмотря на увеличение толщины изоляции в среднем на 0,01…0,02 мм по обе стороны, провода марки ПЭТВМ имеют такую же эластичность, что и провода ПЭТВ.

К проводам класса нагревостойкости F (ТИ 155) относятся провода марок ПЭТ-155, ПЭТП-155, ПЭТМ.

По своим электроизоляционным свойствам провода марки ПЭТ идентичны проводам ПЭТВ, но имеют повышенную стойкость к действию теплового удара.

Провода ПЭТП имеют диапазон сечений 1,6…11,2 мм^2.

Провода для механизированной намотки ПЭТМ выпускаются в диапазоне диаметров 0,8…1,32 мм.

Для эксплуатации в среде хладона применяются провода ПЭФ-155, отличающиеся от проводов ПЭТМ лишь тем, что их изоляция удовлетворяет специальным требованиям работы в двигателях холодильников.

Таблица 2.6. **Ассортимент и расчетные размеры медных эмалированных проводов**

Номинальный диаметр голой проволоки, мм	Расчетный наружный диаметр, мм			Номинальный диаметр голой проволоки, мм	Расчетный наружный диаметр, мм		
	ПЭЛ	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1	ПЭТ-200, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТВ		ПЭЛ	ПЭВ-1, ПЭМ-1, ПЭЛР-1, ПЭВТЛ-1	ПЭТ-200, ПЭВ-2, ПЭМ-2, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-2, ПНЭТ, ПЭТВ
0,02	0,03	0,03	—	0,425	0,460	0,455	0,465
0,025	0,035	0,035	—	0,45	0,485	0,48	0,49
0,032	0,04	0,042	—	0,475	0,510	0,505	0,515
0,04	0,05	0,052	—	0,50	0,54	0,545	0,555
0,05	0,062	0,07	—	0,53	0,57	0,575	0,585
0,06	0,072	0,083	0,087	0,56	0,60	0,605	0,615
0,07	0,082	0,093	0,097	0,60	0,64	0,645	0,655
0,08	0,092	0,103	0,107	0,63	0,67	0,675	0,685
0,09	0,102	0,113	0,117	0,67	0,71	0,715	0,730
0,10	0,115	0,123	0,127	0,71	0,76	0,755	0,770
0,112	0,135	0,143	0,147	0,75	0,80	0,80	0,815
0,125	0,140	0,148	0,153	0,85	0,90	0,90	0,915
0,132	0,147	0,155	0,159	0,90	0,95	0,95	0,965
0,14	0,155	0,163	0,167	0,95	1,00	1,00	1,015
0,15	0,168	0,177	0,180	1,00	1,06	1,07	1,08
0,16	0,178	0,187	0,190	1,06	1,12	1,13	1,14
0,17	0,188	0,197	0,200	1,12	1,18	1,19	1,20
0,18	0,198	0,207	0,210	1,18	1,24	1,25	1,26
0,19	0,208	0,217	0,220	1,25	1,31	1,32	1,33
0,20	0,222	0,227	0,230	1,32	1,38	1,39	1,40
0,212	0,234	0,239	0,242	1,40	1,465	1,47	1,48
0,224	0,246	0,251	0,254	1,50	1,565	1,57	1,58
0,236	0,258	0,266	0,271	1,60	1,665	1,67	1,68
0,25	0,272	0,28	0,285	1,70	1,765	1,77	1,78
0,265	0,291	0,295	0,30	1,80	1,865	1,875	1,88
0,28	0,306	0,31	0,315	1,90	1,965	1,975	1,98
0,30	0,326	0,33	0,335	2,00	2,065	2,075	2,08
0,315	0,345	0,345	0,350	2,12	2,185	2,205	2,21
0,355	0,365	0,365	0,370	2,24	2,305	2,325	2,33
0,355	0,385	0,385	0,395	2,36	2,425	2,445	2,45
0,375	0,405	0,405	0,415	2,50	2,565	2,585	2,59
0,40	0,435	0,43	0,44				

Класс нагревостойкости С (ТИ 180 и выше) имеют медные круглые провода ПЭТ-200 и медные прямоугольные ПЭТП-200. Прямоугольные провода выпускаются в диапазоне сечений 1,6…11,2 мм^2. Эти провода имеют высокую механическую прочность, выдерживают тепловые удары при 280^0 С.

Для длительных рабочих температур 220—240^0 С изготавливаются медные провода ПЭТ-имид и медные никелированные марки ПИЭТ-имид в диапазоне диаметров 0,1…2,5 мм.

Прямоугольные никелированные медные провода ПИЭТП-имид выпускаются с сечениями 1,4…5,1 мм^2. Толщина полиимидной изоляции этих проводов несколько ниже, чем у обычных эмалированных проводов.

Для специальных применений изготавливаются провода эмалированные с двойной изоляцией, провода с гибкой керамической и стеклоэмалевой изоляцией, провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией, провода со стекловолокнистой дельта-асбестовой и стеклянной изоляцией, а также провода с пленочной и пластмассовой изоляцией [12,16].

Эмалированные провода с двойной изоляцией ПЭВД и ПЭВДД имеют класс нагревостойкости А (ТИ 105) и выпускаются диаметром 0,06…0,45 мм. При нагревании дополнительный слой изоляции расплавляется и склеивает витки катушек без пропитывающих лаков.

Провода ПЭВТР имеют дополнительный термореактивный слой, повышающий допустимые температуры. Провод ПЭВТЛК имеет также дополнительное покрытие, повышающее механическую прочность.

Провода с гибкой керамической изоляцией ПЭЖБ допускают длительную работу при 400^0 С и в течение 2000 ч при 500^0 С.

Провода с волокнистой и эмалево-волокнистой изоляцией марок ПБД и АПБД имеет класс нагревостойкости А (ТИ 105). Изоляция — эмаль и хлопчатобумажная пряжа.

С двойной изоляцией из натурального шелка выпускаются провода ПШД, ПШДКМ, ПШДКТ. Выпускаются также провода двойной лавсановой изоляцией марки ПЛД.

Медные провода с эмалево-волокнистой изоляцией марок ПЭШО, ПЭЛО и ПЭБО имеют эмалевую изоляцию и шелковое или лавсановое полотно.

Провода со стекловолокнистой изоляцией ПСД-Л, ПСДТ, ПСДТ-Л, АПСД имеют классы нагревостойкости F и Н (ТИ 155 и 180). Круглые провода марок ПСД и ПСДК выпускаются диаметром от 0,5 до 5 мм. Диапазон сечений проводов прямоугольного сечения от 2 до 5 мм^2.

Для изготовления обмоток с внутренним охлаждением применяются провода ПСДП (полный проводник прямоугольного и квадратного сечений)

с площадью сечения от 2 до 53 мм^2. Класс нагревостойкости этих проводов F (ТИ 155).

Провода марки ПОЖ предназначены для длительной работы при 300^0 С в течение ограниченного времени при 500…600^0 С. Такие провода имеют диаметры от 0,315 до 3 мм, прямоугольные — от 1,9 до 20 мм^2.

Для изготовления двигателей электроподвижного состава применяются круглые и прямоугольные провода марки ПЭТВСД, имеющие эмалевую и стеклянную изоляцию. Диаметр круглых проводов 0.85…2,5 мм. Сечение прямоугольных проводов 2,5…25,2 мм^2. Класс нагревостойкости F (ТИ 155).

Для обмоток высоковольтных машин используются прямоугольные провода с комбинированной пленочно-волокнистой изоляцией матки ППЛБО. Изоляция включает три слоя лавсановой пленки и один слой хлопчатобумажной пряжи. Диапазон сечений от 3 до 80 мм^2. Класс нагревостойкости А (ТИ 105). Среднее пробивное напряжение 9 кВ.

Для изготовления протяжных обмоток погружных маслозаполненных электродвигателей переменного тока с номинальным напряжением 1000…2000 В, работающих в пластовой жидкости, применяют медные провода ПЭТВПДЛ-3 и ПЭТВПДЛ-4. Изоляция состоит из слоя нагревостойкости высокопрочной эмали и 3 или 4 слоев лавсановой пленки. Провода выпускаются диаметрами 1,7…2,8 мм с толщиной изоляции 0,55…0,68 мм. Класс нагревостойкости Е (ТИ 120).

Нагревостойкие обмоточные провода для погружных двигателей ППФ, ППФИ, ППИ имеют изоляцию из ленточного фторопласта-4 и полимидно-фторопластовой пленки.

Обмоточные провода марки ПЭВВП предназначены для изготовления обмоток, укладываемых в закрытые пазы протяжной, и применяются для двигателей напряжением 380 В при рабочей температуре до +70^0 С.

Провода ПВДП-1 и ПВДП-2 имеют рабочее напряжение 380 и 660 В. Изоляция двухслойная из полиэтилена.

Обмоточные провода с дельта-асбестовой изоляцией ПДА имеют класс нагревостойкости F (ТИ 155) и выпускаются диаметрами 1,81…4,8 мм. Провода ПДА постепенно заменяются проводами со стекловолокнистой изоляцией.

Сверхпроводящие и криопроводящие обмоточные провода выпускаются в однопроволочном и многопроволочном исполнениях из легкодеформируемых сплавов ниобий—титан, ниобий—цирконий—титан, ниобий—цирконий. Проволоки заключены в медную матрицу, которая покрывается эмалево-волокнистой или пленочной изоляцией. Созданные многопроволочные провода из сплавов НТ-50 допускают ток 120 кА при индукции 6 Тл [12].

Для пайки проводников применяют припои. Припои делятся на мягкие и твердые. Наибольшее применение получили оловянно-свинцовые припои ПОС-90, ПОС-61, ПОС-50, ПОС-40, ПОС-30, ПОС-18. Цифры обозначают процентное содержание олова [2]. Мягкие припои заменяются медно-фосфористыми припоями марок ПМФ-7 и ПМФ-9. Цифрами обозначается содержание фосфора.

Серебряные припои ПСр-71 (71% серебра, 28% меди и 1% фосфора) обеспечивают прочность спаев, превосходящую прочность меди. Серебряные припои применяют в специальных электрических машинах, работающих в тяжелых условиях эксплуатации.

От правильного выбора обмоточных проводов во многом зависит срок службы электрической машины. Даже если превышения температур при различных сортах провода близки друг к другу, срок службы может отличаться в несколько раз.

При изготовлении обмоток большое значение имеет выбор натяжения и радиусов изгиба провода. Пропитывающие лаки и компаунды не должны оказывать вредного воздействия на изоляцию проводов.

Наиболее распространенные пропитывающие лаки для эмалированных проводов — глифталемасляные (ГФ-95, МЛ-92), амидный (АФ-17 и ФЛ-98) и глицеридомасляный (марки КФ-95). Наиболее влагостойким пропитывающим лаком класса нагревостойкости В (ТИ 130) является лак ПЭ-933.

Для цементации обмоток наиболее применяем компаунд КП, имеющий класс нагревостойкости В (ТИ 130).

После обмотки сечение провода изменяется, поэтому сопротивление фазы может изменяться от максимального до минимального значения в зависимости от технологии изготовления и допусков на изготовление проволоки [2,12].

2.5. КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Для изготовления частей машины, несущих механические нагрузки и обеспечивающих соединение машины в единое целое, используют конструкционные материалы. Их делят на три группы: черные, цветные металлы и пластмассы.

К черным металлам относятся литая сталь, серый и ковкий чугун, различные сорта и профили прокатных сталей. Литую сталь в электрических машинах применяют для изготовления частей машины, выполняющих одновременно роль конструкционных частей и части магнитопровода, где замыкается постоянный поток. В машинах постоянного тока — это станина, основные и добавочные полюсы; в неявнополюсных синхронных машинах — бочка ротора, а в явнополюсных — полюсы индуктора и индуктор (обод ротора).

Литая сталь применяется также для изготовления деталей с высокими механическими напряжениями — втулок коллектора, подшипниковых щитов тяговых и взрывозащищенных машин. Изготовление деталей из литья связано с большой трудоемкостью, поэтому там, где это допустимо, литую сталь заменяют сварными деталями из листовой стали. В электромашиностроении применяют литую сталь марок 20Л, 35Л, 45Л (ГОСТ 977—88).

Серый чугун марок СЧ12-28, СЧ15-32, СЧ18-36, СЧ21-20, СЧ28-48 (ГОСТ 1412—85) применяют для изготовления станин асинхронных и синхронных машин, подшипниковых щитов.

Из ковкого чугуна (ГОСТ 1215—79) путем отливки изготавливают станины, втулки, подшипниковые щиты, нажимные шайбы, маховики, шкивы и полумуфты. Преимущество ковкого чугуна по сравнению с серым заключается в пластичности и высокой износостойкости.

В электромашиностроении применяют круглую, листовую, шестигранную и квадратную прокатную сталь.

Сталь круглую (ГОСТ 2590—88 и ГОСТ 7417—75) используют для изготовления валов, втулок, шестерен и других деталей.

Сталь шестигранную (ГОСТ 8560—78) применяют для изготовления деталей, имеющих шестигранную часть: болтов, гаек и других деталей. Крупные болты изготовляют из круглой стали с высадкой шестигранной головки.

Сталь квадратная (ГОСТ 2591—88 и ГОСТ 8559—75) идет на изготовление стержней, пальцев щеткодержателей и других деталей.

Сталь листовую применяют для изготовления листов полюсов машин постоянного тока и переменного тока, фундаментных плит, стояков подшипников и многих других деталей (диффузоров, распорок и т. д.).

Жесть белую холоднокатаную горячего лужения и ленточную толщиной 0,18…0,5 мм, покрытую с обеих сторон слоем олова, применяют при изготовлении бандажей, скрепок, табличек. Она хорошо штампуется и устойчива против коррозии.

Углеродистую стальную холоднокатаную проволоку используют при изготовлении пружин щеткодержателей, запоров крышек и других деталей.

Проволоку стальную луженную бандажную выпускают немагнитной и магнитной и применяют для изготовления бандажей обмоток асинхронных двигателей постоянного тока. Диаметр проволоки 0,5; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 1,6; 2,0; 2,5; 3,0 мм.

Детали из алюминиевого литья легче чугунных и стальных, но ненадежность резьбы вызывает необходимость армирования втулками.

Алюминиевые литые сплавы применяются для изготовления корпусов, подшипниковых щитов, вентиляторов и других деталей электрических машин. Ал2 — алюминиево-кремнистый сплав, используется для изготовления деталей сложной формы и требующих высокой герметичности;

Ал11— алюминиево-кремнисто-цинковый сплав, применяется для изготовления крупных деталей сложной формы, несущих большие статические нагрузки. Детали из этих сплавов отливаются в кокиль, под давлением и в земляные формы.

Литые сплавы с содержанием меди — латуни — используются для отливки щеткодержателей и других токоведущих деталей. ЛС59-1 — латунь свинцовая. ЛС80-3Л — латунь кремнистая. Детали из этих сплавов отливаются центробежным способом и по выплавляемым моделям.

В электромашиностроении находит большое применение сортовой прокат цветных металлов. Это латунь Л63 и латунь свинцовистая ЛС59-1. Поставляются они в виде проволоки, лент, листов и прутков круглого, квадратного и шестигранного сечения, используются для изготовления деталей ковкой, штамповкой и механической обработкой.

Бронзу БрОЦС — оловянисто-цинково-свинцовую — применяют для деталей, работающих на трение (втулки, вкладыши, червячные колеса).

Баббиты БКА, БК2, Б-89, Б-83, Б-16, Б-6, БН и БТ используются для заливки втулок, сегментов и вкладышей подшипников скольжения.

В качестве конструкционных материалов в электрических машинах достаточно широко применяются пластмассы. При нагреве пластмассы под влиянием давления приобретаются очертания пресс-формы. Пресс-порошки в определенных соотношениях составляют основные составляющие пластмассы. В большинстве случаев пластмассы состоят из двух компонентов: связующего и наполнителя. В качестве связующего используется органический полимер, обладающий способностью деформироваться, в качестве наполнителя — опилки, асбестовое и стеклянное волокно, бумага, ткани, кварцевый песок и др. Наполнители существенно снижают стоимость пластмассы.

Технология изготовления пластмасс определяется связующим веществом. Большинство пластмасс требует при изготовлении горячей прессовки. Эти пластмассы делятся на термопластичные (термопласты) и термореактивные (реактопласты). К термопластам относятся пластмассы на основе поливиниловых и полиамидных смол, эфиров целлюлозы и др., к реактопластам — пластмассы на основе фенолформальдегидных, карбомидных и других термореактивных смол.

Из термореактивных пластмасс изготавливают колодки зажимов, изоляционные втулки и другие детали. Широко применяются спрессованные детали — щеточные пальцы, траверсы и другие детали. В двигателях серии АИ из пластмассы на малых высотах оси вращения изготавливаются вентиляторы [2].

Глава третья. **Конструкция и схемы обмоток электрических машин**

В современных электрических машинах наибольшее распространение получили цилиндрические разноименнополюсные (барабанные) обмотки. Проводники таких обмоток располагаются вдоль воздушного зазора машины и не охватывают магнитопровода статора и ротора. Другие типы обмоток встречаются только в некоторых специальных типах электрических машин [6].

3.1. ТИПЫ ОБМОТОК И ИХ ИЗОЛЯЦИЯ

Обмотки бывают сосредоточенными или распределенными. В сосредоточенных обмотках витки, образующие полюс, объединены в одну, как правило, многовитковую катушку, которая насаживается на ферромагнитный сердечник. Полюс, образованный катушкой и сердечников, называют явно выраженным.

Сосредоточенные обмотки полюсов машин постоянного и переменного тока одинаковы по схемам соединения и различаются между собой лишь особенностями конструктивного исполнения и способами крепления катушек. Обмотки возбуждения почти всех машин постоянного тока выполняют сосредоточенными. В машинах переменного тока сосредоточенными выполняют обмотки возбуждения синхронных машин с частотой вращения не более 1500 об/мин. Такие машины называют машинами с явно выраженными полюсами на роторе или машинами с явнополюсными роторами (рис. 3.1).

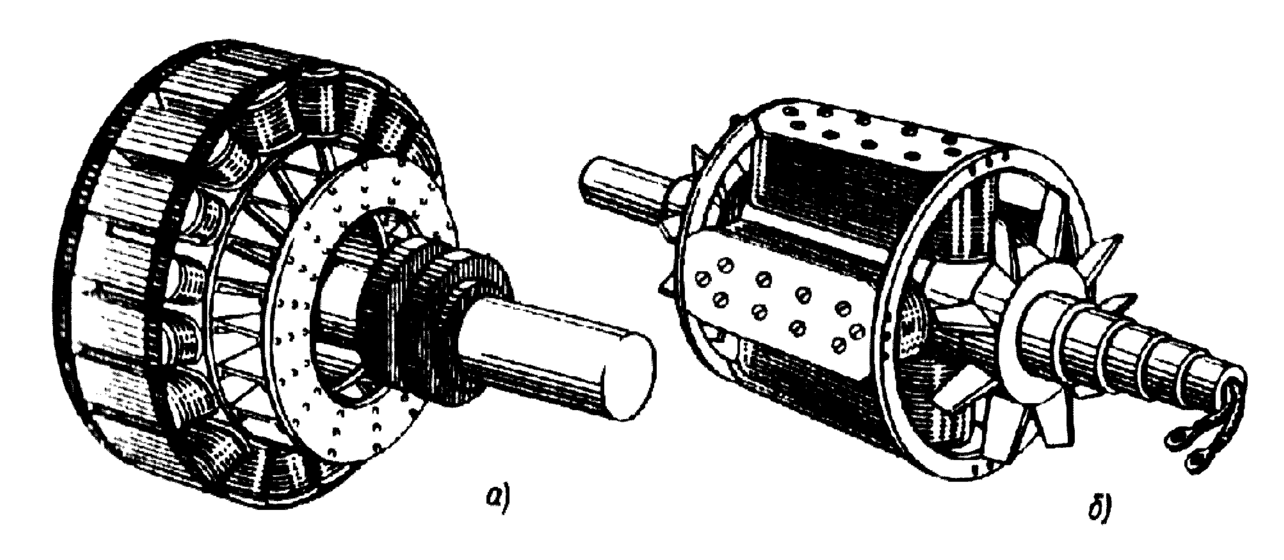


Рис. 3.1. роторы синхронных машин с явно выраженными полюсами: *а* — многополюсный; *б* — четырехполюсный

Распределенные обмотки состоят из катушек с относительно небольшим числом витков каждая (в машинах большой мощности — до одного-двух витков в катушке). Катушки размещают равномерно по всей длине окружности воздушного зазора в пазах статора или ротора (рис. 3.2). Соединенные между собой по определенной схеме катушки образуют так называемые неявно выраженные полюсы машины.

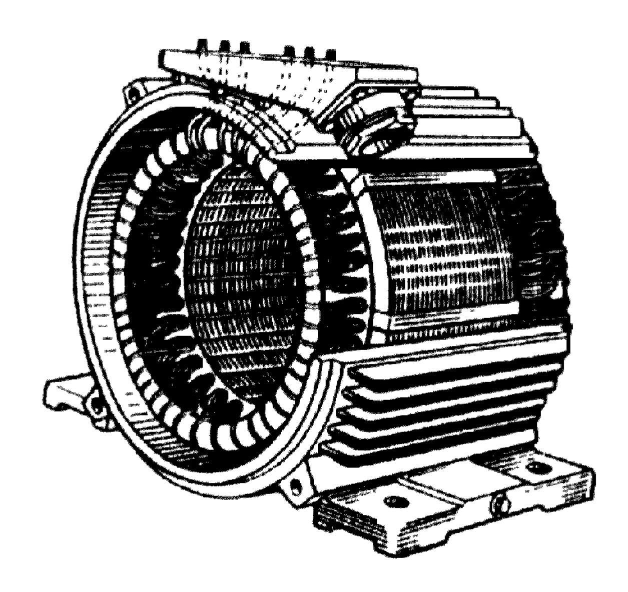


Рис. 3.2. Статор машины переменного тока с распределенной обмоткой

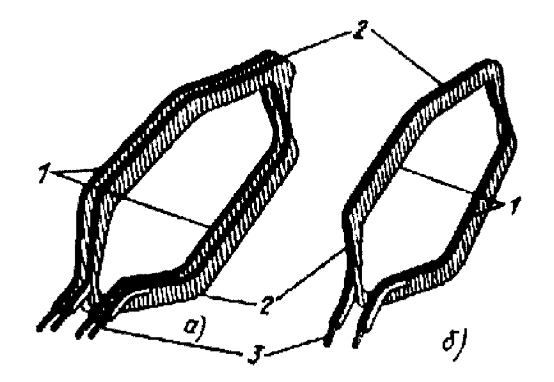


Рис. 3.3. Катушки распределенной обмотки из прямоугольного провода:

а подразделенная; *б* — цельная;
1 — пазовые части; *2* лобовые части;
3 — выводные концы

Распределенные обмотки приняты в статорах и фазных роторах асинхронных машин, в статорах синхронных машин, якорях машин постоянного тока и в роторах синхронных машин с частотой вращения 3000 об/мин (в неявнополюсных роторах). В ряде конструкций машин постоянного тока обмотки возбуждения также выполняют распределенными.

Катушки распределенной обмотки (рис. 3.3) наматывают обмоточным проводом. Прямолинейные части витков, располагающиеся в пазах магнитопровода, называют пазовыми частями; криволинейные, которые соединяют пазовые части между собой, — лобовыми частями витка. Аналогичные названия — пазовые и лобовые части — имеют соответствующие части катушки. Участки изгибов лобовых частей называют головками катушек, начала и конец обмоточного провода, которым намотана катушка, — выводными концами катушки.

Стороны катушек распределенных обмоток могут занимать либо целый паз, либо только половину (рис. 3.4). В первом случае обмотку называют однослойной, во втором — двухслойной, так как стороны катушек располагают в пазах в два слоя: одна в нижней половине паза — нижний слой, вторая в верхней половине — верхний слой.

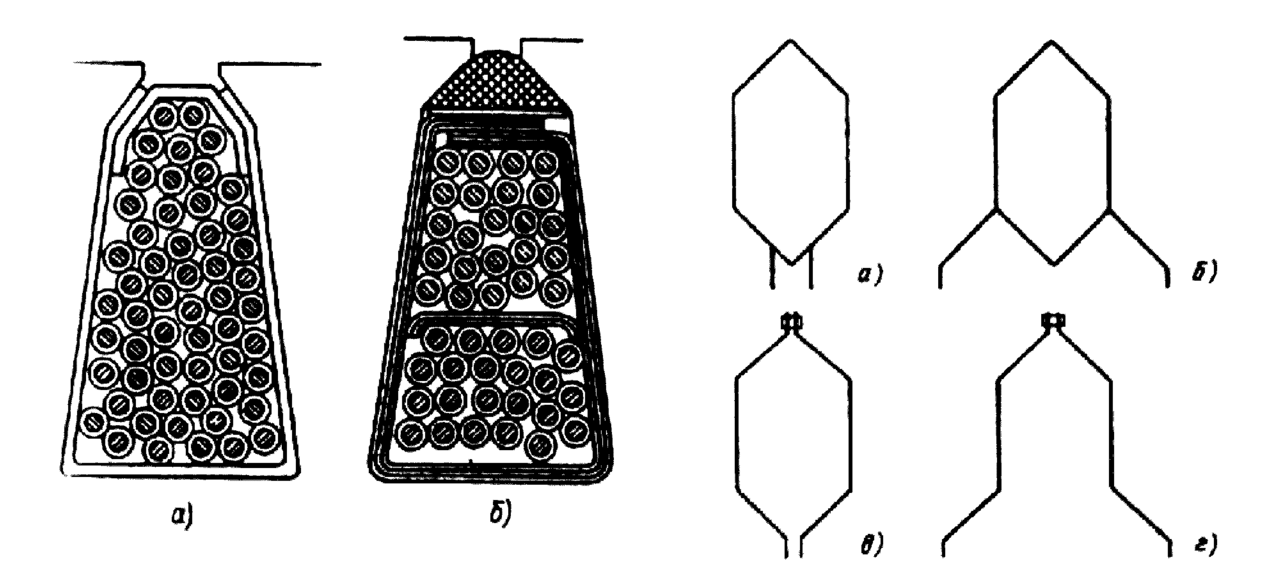


Рис. 3.4. Поперечное сечение полузакрытых пазов статора
с обмоткой из круглого провода:
а — машин малой мощности, однослойная обмотка;
б — машин средней мощности, двухслойная обмотка

Рис. 3.5. Схематическое изображение элементов катушечных обмоток:
а — петлевой; *б* — волновой, стержневой обмотки; *в* — петлевой; *г* — волновой

Некоторые типы обмоток изготовляют не из катушек, а из стержней — стержневая обмотка (рис. 3.5). Каждый стержень представляет собой как бы катушку, разрезанную пополам по лобовым частям, и состоит из одной пазовой и двух половин разных лобовых частей. Витки стержневой обмотки образуются после укладки обмотки в пазы и соединения головок стержней друг с другом. В расчетах и схемах стержневая обмотка рассматривается как катушечная с одним витком в катушке.

По направлению отгиба лобовых частей катушек или стержней, который определяет последовательность их соединений между собой, различают петлевые и волновые обмотки (см. рис. 3.5).

Почти все обмотки электрических машин наматывают изолированным обмоточным проводом. Значительно реже для обмоток используют неизолированную прямоугольную проволоку или медные шины, на которые изоляцию наносят в процессе изготовления катушек. Лишь короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей и демпферные или пусковые обмотки синхронных машин не имеют изоляции. Стержни этих обмоток устанавливают в неизолированные пазы магнитопровода, а в большинстве асинхронных двигателей мощностью до 300…400 кВт выполняют заливкой в пазы алюминия или его сплавов.

К изоляции электрических машин предъявляют ряд требований, целью которых является обеспечение надежной работы машины на протяжении всего расчетного срока ее эксплуатации. Изоляция, прежде всего, должна

иметь достаточную электрическую прочность для предотвращения возможного замыкания витков обмотки на металлические части машины или между собой. Для обеспечения этого требования изоляции должна обладать хорошей теплопроводностью, так как иначе тепло, выделяемое в проводниках обмотки, нагреет ее выше допустимых пределов, и электрическая прочность изоляции снится. Кроме того, изоляция обмоток не должна заметно ухудшать свои электрические свойства под воздействием механических усилий, которым она подвергается в процессе укладки обмотки в пазы, а также при работе машины, под воздействием влаги, паров масел и различных газов, которые может содержать окружающий машину воздух. Эти требования определяют необходимые для изоляции термическую и механическую прочность, влаго- и маслостойкость и т. п.

По своему функциональному назначению изоляция обмоток подразделяется на корпусную — наружную изоляцию катушек, изолирующую их от стенок пазов в сердечниках (пазовая изоляция) и от других металлических частей машины (изоляция лобовых частей катушек); междуфазную, изолирующую катушки каждой фазы обмотки от других фаз; витковую, изолирующую каждый виток катушки от других витков; проводниковую — изоляцию каждого из проводников обмотки. Каждый из видов изоляции имеет свою, специфическую конструкцию и к ним предъявляются различные требования.

В общем случае толщина и конструкция всех видов изоляции определяются ее функциональным назначением, уровнем номинального напряжения машины, ее типом и условиями эксплуатации, для которых предназначена данная машина.

В наиболее тяжелых условиях при эксплуатации находится корпусная изоляция пазовых частей катушек обмотки. Ограниченные размеры паза приводят к необходимости выполнения пазовой изоляции в виде тонкого и механически прочного слоя, отвечающего всем перечисленным выше требованиям к изоляции электрических машин, т. е. электрической и механической прочности, теплопроводности и др. Современные электроизоляционные материалы позволяют выполнить пазовую изоляцию машин с номинальным напряжением до 660 В толщиной, не превышающей нескольких десятых долей миллиметра на сторону, а машин высокого номинального напряжения — толщиной, не превышающей нескольких миллиметров на сторону.

Корпусная изоляция по своей конструкции бывает непрерывной или гильзовой. Непрерывную изоляцию образуют обертыванием проводников катушки по всей их длине лентой изоляционного материала, например микалентой, стекломикалентой или стеклослюдинитовой лентой. Ленту обычно наносят вполперекроя (вполнахлеста) в несколько слоев, число которых зависит от номинальное напряжение машины. В большинстве

случаев конструкций после наложения ленты изоляцию пропитывают изолирующими составами — лаками или компаундами для создания монолитного изолирующего слоя и увеличения ее теплопроводности и механической прочности.

Гильзовую изоляцию образуют обертыванием прямолинейных пазовых частей катушек широким листовым изоляционным материалом с последующей горячей обкатной наложенных слоев (мягкая гильза) или горячей обкаткой, опрессовкой и запечкой (твердая гильза). На изогнутые лобовые части катушек с гильзовой изоляцией наносят непрерывную ленточную изоляцию.

Непрерывную и гильзовую изоляцию применяют для обмоток всех машин напряжением 3000 В и выше, в обмотках якорей машин постоянного тока большой мощности, стержневых волновых обмотках фазных роторов асинхронных двигателей, а также в машинах специального, например, влагостойкого исполнения при любом номинальном напряжении.

Пазовые части обмотки машин напряжением до 600 В изолируют коробами из одного или двух слоев изоляционного материала — пленкосинтокартон, электронита, имидофлекса и т. п. Пазовые короба устанавливают в пазы до укладки обмотки. Они не могут служить надежной корпусной изоляцией для обмоток машин более высокого напряжения.

Примеры выполнения изоляции обмоток приведены при описании конкретных конструкций обмоток.

3.2. КОНСТРУКЦИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБМОТОК СТАТОРОВ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обмотки электрической машины в зависимости от ее мощности, номинального напряжения и условий, для работы в которых она предназначена, выполняются из круглого или прямоугольного обмоточного провода. Это определяет также форму пазов магнитопровода машины и конструкцию самих обмоток и изоляции.

Обмотки из круглого провода. В машинах с номинальным напряжением до 660 В и мощностью до 100 кВт обмотки выполняют из круглого обмоточного провода и укладывают в трапециидальные полузакрытые пазы (см. рис. 3.5). При ручной укладки обмотки проводники предварительно намотанных заготовок катушек укладывают в полузакрытые пазы магнитопровода, поочередно пропуская их через шлиц паза, «всыпают». Поэтому обмотку такого типа часто называют всыпной.

При машинной укладке в зависимости от типа обмоточных станков каждый из витков обмотки либо укладывают непосредственно в паз без

предварительной намотки заготовок, либо наматывают заготовки нескольких катушек, а затем втягивают их с торца магнитопровода в пазы. Эти операции осуществляют на автоматических или полуавтоматических обмоточных станках [2].

Наибольший диаметр провода, применяемый для всыпных обмоток, не превышает 1,8 мм, так как провода большего диаметра имеют слишком большую жесткость и плохо уплотняются в пазах во время укладки. Нужное сечение эффективного проводника обеспечивается выполнением обмотки из нескольких элементарных проводников.

При проектировании машин для уменьшения необходимого числа элементарных проводников выбирают обмотку с несколькими параллельными ветвями.

Примеры конструкции изоляции обмотки из круглого провода приведены в табл. 3.1 и 3.2. Пазовая часть обмотки изолирована коробами из пленкослюдопласта или из двух слоев различных материалов, например, пленкосинтокартона и электронита. В двухслойных обмотках между верхним и нижним слоями устанавливают изоляционную прокладку, имеющую несколько большую ширину, чем паз. Отогнутые вниз края прокладки предохраняют от возможного проскальзывания проводников одного слоя в другой.

На дно пазов большинства машин с двухслойной обмоткой устанавливают прокладки с целью предохранения материала пазовых коробов от возможных повреждений при уплотнении проводников во время укладки о неровности дна паза, которые возникают из-за технологических допусков при штамповке и шихтовке сердечников.

Проводники обмотки закрепляют в пазах клиньями из текстолита. Под клин устанавливают прокладки из механически прочного изоляционного материала, препятствующие повреждению краев пазового короба при заклинивании пазов. Вместо клиньев обмотка может быть закреплена пазовыми крышками (табл. 3.1), которые изготовляют также из механически прочного изоляционного материала. Пазовые крышки устанавливают на обмоточных станках одновременно с втягиванием катушек при механической раздельной намотке или на станках для заклиновки после намотки совмещенным методом. После пропитки обмотки лаком пазовые крышки приобретают достаточную прочность и жесткость для надежного закрепления проводником и в то же время занимают меньший объем паза по сравнению с клиньями, что способствует лучшему заполнению его проводниками обмотки.

Таблица 3.1. **Изоляция обмотки статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения до 250 мм на напряжение до 660 В**

Рисунок	Тип обмотки	Высота оси вращения, мм	Позиция	Наименование материала изоляции (пленкостеклопласт). Класс нагревостойкости		Толщина материала, мм	Число слоев	Односторонняя толщина, мм
				B	F H			
	Однослойная	50…80	1	Изо-	Имидо-	0,2		0,2
			2	флекс	флекс	0,3	1	0,3
		90…132	1	То же	То же	0,25		0,25
			2			0,35	1	0,35
		160	1	«	«	0,4	1	0,4
			2			0,5		0,5
	Двухслойная	180…250	1	«	«	0,4		0,4
			2			0,4	1	0,4
			3			0,5		0,5

При укладке всыпной обмотки круглые проводники не имеют заранее определенного места в пазу и размещаются в нем произвольно. Поэтому в обмотке специальная витковая изоляция отсутствует. Ее функцию выполняет изоляция обмоточного провода, т. е. проводниковая изоляция. Обмотку из круглого провода применяют в машинах небольшой мощности, имеющих малые габариты и большое число витков, напряжение между которыми, как правило, не превышает нескольких вольт. Электрической прочности проводниковой изоляции в таких обмотках оказывается достаточно для обеспечения надежной работы машины.

Междуфазовой изоляцией в пазовой части двухслойных обмоток являются прокладки между слоями. Лобовые части обмотки не имеют корпусной изоляции, а междуфазовая изоляция устанавливается между катушечными группами в виде фигурных прокладок, вырезанных из листового материала по форме лобовых частей уложенной и отформованной обмотки.

Конструкция изоляции обмоток из круглого провода не обеспечивает необходимой электрической прочности при номинальных напряжениях выше

Таблица 3.2. **Изоляция обмоток из круглого провода статоров асинхронных двигателей с высотой оси вращения $h \geq 280$ мм на напряжение до 660 В**

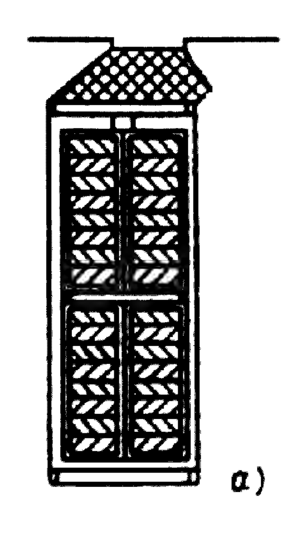
Рисунок	Позиция	Материал						Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм		
		Наименование, марка			Толщина, мм				Класс нагревостойкости		
		Класс нагревостойкости									
		B	F	H	*B*	F	H		*B*	F	H
		Пленкосинтокартон									
	*1**	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28
	*2***	Электронит			0,3	0,3	0,28	1	0,3	0,3	0,28
	—	Общая толщина пазовой изоляции			0,55	0,58	0,56	—	0,55	0,58	0,56
		Лакотканеслюдопласт									
	3	ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,55	0,55	0,55	1	0,55	0,55	0,55
		Пленкосинтокартон									
	4	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28
	5	ПСК-Л	ПСК-Ф	ПСК-Н	0,25	0,28	0,28	1	0,25	0,28	0,28

* К обмотке

** К стенке паза

Примечание. Междуфазовые прокладки в лобовых частях выполняют из лакотканеслюдопласта.

660 В, а малая механическая прочность катушек, особенно их лобовых частей, не позволяет применять круглый провод для обмоток машин мощностью более 100 кВт, так как в переходных процессах (при пуске, реверсе и т.п.) броски тока в машинах вызывают большие ударные нагрузки на обмотку. Поэтому обмотку из круглого провода применяют в машинах мощностью менее 100 кВт при номинальном напряжении не выше 660 В.



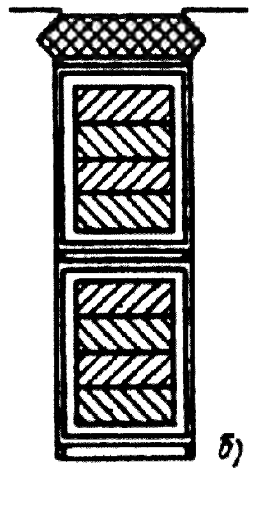


Рис. 3.6. Поперечное сечение пазов статора с обмоткой из прямоугольного провода: *а* полуоткрытого; *б* — открытого

Катушечные обмотки из прямоугольного провода. В машинах мощностью более 100 кВт для придания катушкам большей механической прочности их выполняют из прямоугольного провода и укладывают в пазы с параллельными стенками (рис. 3.6). Катушки наматывают на фигурных шаблонах и уже до укладки в пазы им придают окончательную форму. После укладки лобовые части соседних катушек связывают между собой, а при больших вылетах лобовых частей закрепляют к бандажным кольцам.

Упорядоченное расположение лобовых частей катушек позволяет создать с помощью различных прокладок и бандажей жесткую систему, выдерживающую большие ударные механические нагрузки. При этом обеспечивается возможность прохода воздуха между лобовыми частями соседних катушек, что существенно улучшает условия охлаждения по сравнению с обмоткой из круглого провода. При номинальных напряжениях 3 кВ и выше или в машинах специальных исполнений (влагостойком, химостойком и т. п.) при любых напряжениях катушки имеют непрерывную или гильзовую изоляцию и укладываются в открытые прямоугольные пазы.

Гильзовую изоляцию (табл. 3.3 и 3.4) широко применяют в обмотках машин высокого напряжения. После опрессовки и запечки твердые гильзы имеют высокое пробивное напряжение и высокую механическую прочность. Основным недостатком изоляции является наличие слабого (в электрическом отношении) звена — места стыка двух видов изоляции: гильзовой на прямолинейной пазовой части катушки и непрерывной на лобовой. Этот участок находится непосредственно у выхода прямолинейной части катушки из паза в месте наибольшей напряженности электрического поля — вблизи угла магнитопровода. Тот же участок испытывает и наибольшие деформации как при укладке обмотки, так и при работе машины, так как жесткость лобовых частей катушек существенно меньше, чем пазовых, заключенных в

Таблица 3.3. **Гильзовая изоляция класса иагревостойкости F обмоток статоров машин переменного тока мощностью от 100 до 1000 кВт на напряжение 3000—3300 В**

Часть обмотки	Позиция	Материал			Число слоев		Толщина изоляции, мм	
		Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая	1	Изоляция проводника	—	—	—		—	—
	2	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой в разбежку		0,2	0,2
	3	Стекломикафолий	МФП-Т	0,2	0,5 оборота		2,6	2,6
		Толщина изоляции катушки	—	—	—	—	2,8	2,8
		Допустимые отклонения	—	—	—	—	±0,4	+0,6 -1,2
	4	Стеклолакоткань	ЛСК	0,15	2	3	0,3	0,45
	5	Стеклотекстолит	СТЭФ	0,5	—	1	—	0,5
	6	То же	СТЭФ	0,5	—	1	—	0,5
	7	«	СТЭФ	1,0	—	1	—	1,0
		Допуск на укладку	—	—	—	—	0,5	0,5
		Всего на паз без клина	—	—	—	—	3,6	8,6
Лобовая	8	Стеклянная лента	АЭС	0,1	1 слой в разбежку		0,2	0,2
	9	Стекломикалента	ЛФЭ-ТТ	0,13	5 слоев вполнахлеста		2,6	2,6
	10	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
		Разбухание от пропитки	—	—	—	—	0,5	0,5
		Толщина изоляции катушки	—	—	—	—	3,7	3,7
		Допустимые отклонения	—	—	—	—	±0,5	±1,0
Выводные концы		Стекломикалента	ЛФЭ-ТТ	0,13	4 слоя вполнахлеста		—	—
		Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вполнахлеста		—	—

изоляционную гильзу. Поэтому опасность пробоя изоляции в этих местах увеличивается. Для обеспечения надежности принимают специальные меры для усиления изоляции на стыках гильзовой и непрерывной изоляций катушек.

Современная конструкция непрерывной, пропитанной в компаундах изоляции (табл. 3.5) по своим изоляционным свойствам мало уступает гильзовой, но более надежна из-за однородности слоя изоляции на пазовых и лобовых частях катушек, большей стойкости и коронированию и большей влагостойкости. Пропитка непрерывной изоляции на основе слюдинитовых лент в эпоксидных компаундах с последующей ее запечкой создает систему прочной в электрическом и механическом отношениях термореактивной изоляции. Современные конструкции термореактивной изоляции типа «Монолит» («Монолит-2», «Монолит-4») широко применяют для обмоток машин на номинальное напряжение 3 кВ и выше.

Для обмоток применяют прямоугольные провода с площадью поперечного сечения не более 17...20 мм^2, так как при больших сечениях в проводниках обмотки значительно увеличиваются потери от вихревых токов.

Чтобы уменьшить влияние эффекта вытеснения тока на равномерность распределения плотности тока в каждом из проводников, их располагают в пазу плашмя, широкой стороной сечения параллельно дну паза. Если требуемое сечение витка превышает 20 мм^2, то эффективный проводник образуют из двух или, реже, из четырех или из большего, но обязательно четного числа элементарных проводников.

В катушках, намотанных из двух элементарных проводников, они располагаются рядом на одной высоте (рис. 3.7, *а*), чтобы их индуктивное сопротивление было одинаково. Взаимное расположение четырех элементарных проводников показано на рис. 3.7, *б*.Напряжение между витками в обмотках машин при среднем уровне индукции возрастает с увеличением их габаритов, так как при этом возрастает магнитный поток машины. Машины высокого напряжения изготовляют, как правило, больших мощности и габаритов. Напряжение между витками в их обмотках при номинальном режиме достигает нескольких десятков вольт.

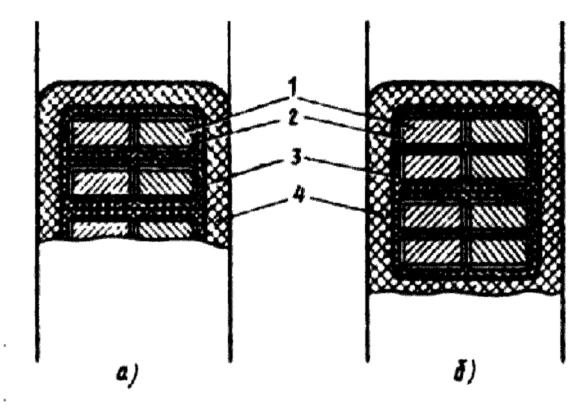


Рис. 3.7. Взаимное расположение элементарных проводников в катушке из прямоугольного провода:
а при $n_{эл} = 2$; *б* – при $n_{эл} = 4$; 1 – эле- ментарные проводники; 2 – проводниковая изоляция; 3 — витковая изоляция; 4 — пазовая изоляция

Таблица 3.4. **Гильзовая термореактивная изоляция класса нагревостойкости В обмоток статоров машин переменного тока мощностью 100…1000 кВт на напряжение 6600 В**

Часть обмотки	Позиция	Назначение изоляции	Материал: Наименование	Материал: Марка	Материал: Толщина, мм	Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм, при числе проводников в катушке: по ширине 1	по ширине 2	по высоте 2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Пазовая	1	Витковая	Собственная изоляция провода ПЭТВСД	—	0,5 на две стороны	—	0,5	1,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
	2	Корпусная	Полотно стеклослюдинитовое	—	0,17	—	4,0		4,0													
			Распухание изоляции провода	—	—	—	0,05	0,10	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
	3	Покровная	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой впритык	0,2		0,2													
		Всего изоляции в катушке					4,75	5,30	5,30	5,85	6,40	6,95	7,50	8,05	8,10	9,15	9,70	10,25	10,8	11,35	11,90	12,45
	4	Прокладка	Стеклотекстолит	СТ-1	0,5	1	—		0,5													
	5	То же	То же	СТ-1	1	2	—		2,0													
	6	«	«	СТ-1	0,5	1	—		0,5													
			Зазор на укладку	—	—	—	0,2		—													
		Всего изоляции в пазу					4,95	5,5	13,6	14,7	15,8	16,9	18,0	19,1	20,2	21,3	22,4	23,5	24,6	25,7	26,8	27,9

Лобовая	1	Витковая	Собственная изоляция провода ПЭТВСД		0,5 на две стороны	—	0,5	1,0	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
		—	Разбухание изоляции	—	—	—	0,05	0,10	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
	7	Корпусная	Слюдопласто-лента	СЛФЧ	0,13	3 слоя вполнах леста	1,56		1,56													
	8	«	Стеклоэкспо новая лента	ЛСЭЛ	0,17	3 слоя вполнах леста	2,04		2,04													
	9	Покровная	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вполнах леста	0,4		0,4													
			Разбухание изоляции	—	—	—	1,0		1,0													
			Всего изоляции в катушке				5,55	6,10	6,10	6,65	7,20	7,75	8,30	8,85	9,40	9,95	10,50	11,05	11,60	12,15	12,7	13,25

Таблица 3.5. **Непрерывная изоляция класса нагревостойкости В обмоток статоров машин переменного тока на напряжение до 10000 В**

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев, не менее	Толщина изоляции, мм	
		Наименование, марка	Толщина, мм		по ширине	по высоте
Пазовая		*Витковая изоляция*				
	1	Изоляция проводника				
		Корпусная изоляция				
	2	Стеклослюдинитовая лента ЛС на напряжение:	0,13			
		10,5 кВ		9 вполнахлеста	6	6
		6,6 кВ		6 вполнахлеста	4,5	4,5
		≤ 660 В		3 вполнахлеста	2	2
	3	Лента стеклянная ЛЭС. Толщина изоляции катушечной стороны на напряжение:	0,1	1 встык	0,2	0,2
		10,5 кВ			6,2	6,2
		6,6 кВ			4,7	4,7
		≤ 660 В			2,2	2,2
		Прокладки в пазу				
	4	Стеклотекстолит СТ-1	1	2		2
	5,6	Стеклотекстолит СТ-1. Общая толщина изоляции на паз на напряжение:	0,5	2		1
		10,5 кВ			6,2	15,4
		6,6 кВ			4,7	12,4
		≤ 660 В			2,2	7,4

	1	Изоляция проводника	—	—	—	—
	7	Стеклослюдинитовая лента ЛС на напряжение:	0,13			
		10,5 кВ		9 вполнахлеста	6	6
Лобовая		6,6 кВ		6 вполнахлеста	4,5	4,5
		≤ 660 В		3 вполнахлеста	2	2
	8	Лента стеклянная ЛЭС (покровная)	0,1	1 встык	0,2	0,2
		Неплотности и неровности. Общая толщина изоляции катушечной стороны на напряжение:	—	—	1	1
		10,5 кВ			7,2	7,2
		6,6 кВ			5,7	5,7
		≤ 660 В			3,2	3,2

Например, в асинхронных двигателях мощностью около 1000 кВт с номинальным напряжением 6 кВ напряжение между витками превышает 50 В. При различных перенапряжениях, связанных с коммутационными процессами (включением и отключением двигателей) или атмосферными (грозовые перенапряжения), этот уровень может повышаться в несколько раз. Особенно большие перенапряжения, в десятки и более раз, приходятся на витки первой катушки каждой фазы. Поэтому вопросам увеличения надежности витковой изоляции обмоток крупных электрических машин уделяют большое внимание.

В современных машинах высокого напряжения витковую изоляцию выполняют из ленточного материала (микаленты или стекломикаленты), который накладывают по всей длине каждого из витков поверх проводниковой изоляции.

Если эффективный проводник обмотки состоит из нескольких элементарных, витковая изоляция охватывает одновременно все элементарные проводники (см.

рис. 3.7.). Толщина витковой изоляции для обмоток машин высокого напряжения приведена в табл. 3.6.

Таблица 3.6. **Витковая изоляция обмоток статоров машин переменного тока с гильзовой изоляцией на напряжение 3300 В и непрерывной компаундированной на напряжение 3300...6600 В**

Класс нагревостойкости	Исполнение корпусной изоляции обмоток	Марка обмоточного провода	Витковая изоляция	
			Материал, толщина, мм, и способ наложения	Двусторонняя толщина изоляции одного витка, мм
Е, В	Непрерывная компаундированная	ПСД	Микалента ЛФЧ-П, 0,1…0,13 мм, 1 слой в 1/3 нахлеста	0,4…0,5
В	Гильзовая	ПСД	Микалента ЛФЧ-П, 0,1…0,13 мм, 1 слой в 1/3 нахлеста	0,4…0,5
F	«	ПСД	Стекломикалента СЭЛГГ, 0,5…0,13 мм; 1 слой в 1/3 нахлеста	0,5
B, F	Гильзовая и непрерывная компаундированная	ПЭТВСД	—	—

Следует отметить, что кабельная промышленность выпускает обмоточные провода нескольких марок с усиленной изоляцией, при которой не требуется наложения на проводники дополнительного слоя витковой изоляции. Для высоковольтных обмоток с изоляцией класса нагревостойкости *B* выпускают обмоточные провода марки ПЭТВСД с усиленной эмалеволокнистой изоляцией. Разработаны также аналогичные провода для обмоток высокого напряжения класса нагревостойкости F, имеющие изоляцию из стеклослюдинитовых лент. Толщина усиленной проводниковой изоляции меньше, чем обычной проводниковой и витковой изоляции, наложенной на проводник в процессе изготовления катушек, что дает возможность повысить использование зубцовой зоны машины, значительно уменьшает трудоемкость изготовления катушек (отпадает операция по наложению дополнительной витковой изоляции) и повышает надежность изоляции обмотки.

При укладке обмоток в машины высокого напряжения в пазах устанавливают прокладки из механически прочного изоляционного материала (см. табл. 3.3 и 3.4): на дно паза — для предохранения корпусной изоляции катушек от возможного повреждения о неровности дна паза; между слоями обмотки — для придания определенного расстояния между катушками, необходимого для правильного

размещения их лобовых частей; под клин — для предохранения изоляции от повреждения при заклинивании и плотного закрепления сторон катушек в пазах.

В машинах напряжением до 660 В с усиленной изоляцией (влагостойкой, химостойкой и т.п.) также применяют обмотки из прямоугольных проводов с гильзовой или непрерывной изоляцией (табл. 3.7 и 3.8). Конструкция ее изоляции в основном аналогична конструкции изоляции обмоток высокого напряжения, но имеет меньшую толщину. Применяют два типа гильз — твердые и мягкие. Твердые гильзы, так же как и в изоляции машин высокого напряжения, выполняют из микафолия, стекломикафолия или из материалов на основе слюдинита с обкаткой горячими утюгами, опрессовкой и последующей запечкой. Мягкие гильзы выполняют из листового материала типа гибкого миканита с последующей обкаткой нанесенных слоев горячими утюгами. Непрерывная изоляция обмоток низкого напряжения по конструкции и технологии изготовления такая же, как и для машин высокого напряжения, но содержит меньшее число слоев. В обмотках некоторых машин изменено, по сравнению с машинами высокого напряжения, исполнение витковой изоляции. Для усиления изоляции между витками в пазовой и лобовых частях устанавливают прокладки из гибкого изоляционного материала (см. табл. 3.7).

Если номинальное напряжение машины мощностью более 100 кВт не превышает 660 В и к ее изоляции не предъявляют какие-либо специальные требования, то применяют обмотку из подразделенных катушек (см. рис. 3.3, *а*). Катушки такой обмотки также наматывают из прямоугольного провода, но их пазовая изоляция имеет конструкцию, принятую в обмотке из круглого провода, т. е. изолируют не катушки, а пазы машины. Отсутствие корпусной изоляции на самих катушках позволяет сделать их подразделенными — по ширине паза располагают по две стороны катушек в каждом слое. Это позволяет уменьшить ширину шлица паза (см. рис. 3.6, *а*). Такие пазы называют полуоткрытыми. Последовательность укладки подразделенных катушек (их часто называют полукатушками) в полуоткрытые пазы машины показана цифрами *1* *4* на рис. 3.8.

В такой обмотке изоляции между соседними по ширине паза катушками отсутствует, поэтому их соединяют между собой только параллельно, чтобы напряжение между двумя, лежащими рядом по ширине паза проводниками, было равно нулю. Такие проводники являются как бы двумя элементарными, образующими один эффективный.

Корпусную изоляцию обмоток из подразделенных катушек выполняют из нескольких слоев листового материала в виде пазового короба. Такая конструкция менее надежна, чем гильзовая или непрерывная изоляция катушек, укладываемых в открытые пазы,

Таблица 3.7. **Гильзовая изоляция (твердая гильза) обмоток статоров машин переменного тока на напряжение до 660 В**

Класс нагревостойкости *B* нормального и усиленно-влагостойкого исполнения								
Часть обмотки	Позиция	Материал			Количество слоев		Толщина изоляции, мм	
		Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая	*1*	Витковая изоляция*	—					
	2	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
	3	Микафолий	МФГ	0,2	3,5 оборота		1,4	1,4
		Двусторонняя толщина изоляции пазовой части катушки	—				1,6	1,6
	4	Электронит	—	0,2	2	3	0,4	0,6
	5	То же	—	0,5	—	1	—	0,5
	6	Лакостекломиканит	ГФГС-ЛСБ	0,5	—	1	—	0,5
	7	Текстолит	В	—	—	—	—	0,5
		Допуск на укладку		0,5	—	1	0,3	0,5
		Всего на паз (без клина и витковой изоляции)		—	—	—	2,3	5,8
Лобовая	*8*	Микалента	ЛФЧ-11	0,17	2 слоя вполнахлеста		1,4	1,4
	9	Стеклянная лента	ЛЭС	0,10	2 слой вполнахлеста		0,4	0,4
	10	То же	ЛЭС	0,10	1 слой вразбежку		0,2	0,2
		Разбухание изоляции от пропитки	—	—	—		0,5	0,5
		Двусторонняя толщина изоляции лобовой части катушки	—	—	—		2,5	2,5
Класс нагревостойкости *B* тропического исполнения, классы нагревостойкости F и H всех исполнений								

Часть обмотки	Позиция	Материал					Число слоев		Толщина изоляции, мм	
		Наименование	Марка для класса нагревостойкости			Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
			B	F	H					
Пазовая (то же, что для класса нагревостойкости *B* нормального исполнения)	*1*	Витковая изоляция *								
	2	Стеклянная лента	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,2	1 слой вразбежку		0,2	0,2
	3	Стекло-микафолий	СМФГ	МФП-Т	СМФК	0,2	3,5 оборота		1,4	1,4
		Двусторонняя толщина изоляции пазовой части катушки							1,6	1,6
	4	Стеклолако-ткань	ЛСБ	ЛСБ	ЛСК	0,15	2	3	0,3	0,45
	5	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК-41	0,5		1		0,5
	6	Лакостекломиканит	ГФГС-ЛСБ	ГФПС-ЛСП	ГФКС-ЛСК	0,5	—	1	—	0,5
	7	Стеклотекстолит	СТ	СТЭФ	СТК-41	0,5	—	1	—	0,5
		Допуск на укладку							0,3	0,5
		Всего на паз (без клина и витковой изоляции)							2,2	5,7
	8	Стекломикалента	С2ЛФГ	С2ЛФГ	ЛС2ФК	0,17	2 слоя вполнахлеста		1,4	1,4
	9	Стеклянная лента	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,10	1 слой вполнахлеста		0,4	0,4
	10	То же	ЛЭС	ЛЭС	ЛЭС	0,10	1 слой вразбежку		0,2	0,2
Лобовая (то же, что для класса нагревостойкости *B* нормального исполнения)		Разбухание изоляции от пропитки							0,5	0,5
		Двусторонняя толщина изоляции лобовой части катушки							2,5	2,5

* В качестве витковой изоляции в обмотках с изоляцией класса нагревостойкости B применяют прокладки из гибкого миканита ФГФЧО, в обмотках с изоляцией класса нагревостойкости F — из гибкого стекломиканита $Г_2$ФЭ1, в обмотках с изоляцией класса нагревостойкости H — из гибкого стекломиканита $Г_2$ФК11. Толщина прокладок 0,2—0,25 мм.

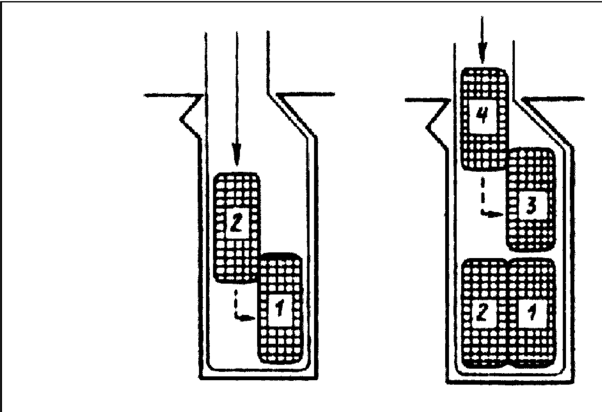


Рис. 3.8. Последовательность укладки подразделенных катушек
в полуоткрытые пазы статора (показана стрелками и цифрами)

но широко применяются, так как машины, статоры которых выполнены с полуоткрытыми пазами, более экономичны. Лобовые части подразделенных катушек изолируют ленточным материалом.

Конструкция изоляции обмотки из подразделенных катушек приведена в табл. 3.9. Для корпусной изоляции класса нагревостойкости *B* в современных машинах используют листовой слюдопласт, имеющий достаточные механическую и электрическую прочности, что позволяет выполнить пазовый короб из одного слоя лакослюдопласта. При этом толщина изоляции по сравнению с многослойной уменьшается при той же электрической и механической прочности, а теплопроводность возрастает.

Полукатушки при изготовлении обмоток наматывают попарно из прямоугольных проводов марок ПЭВП (классы нагревостойкости *А* и Е), ПЭТВП (класс нагревостойкости В) и ПЭТП-155 (класс нагревостойкости F).

В пазовой части дополнительную витковую изоляцию не устанавливают, так как двойной слой проводниковой изоляции обмоточных проводов этих марок обеспечивает достаточную надежность изоляции между витками обмотки.

В лобовых частях устанавливают прокладки между первыми тремя витками каждой полукатушки, так как эти витки испытывают большое относительное удлинение от растягивающих усилий при их намотке, которое может привести к снижению прочности проводниковой изоляции или к ее повреждению.

После намотки витки полукатушек для предохранения от рассыпания проклеивают лаком (обволакивают) и скрепляют по длине пазовой части телефонной (при классе нагревостойкости В) или фенилоновой (при классе нагревостойкости F) бумагой и опрессовывают [2].

Стержневые обмотки статоров. Отдельным элементом стержневой обмотки является не катушка, а стержень. Стержни укладывают в пазы поочередно и только после укладки соединяют между собой в лобовых частях, образуя витки обмотки. Стержневая обмотка выполняется петлевой или волновой. В зависимости от этого меняется направление отгиба лобовых частей стержня. С точки зрения электромагнитного расчета, стержневая обмотка идентична катушечной с одним витком в каждой катушке, но имеет ряд особенностей, обусловленных тем, что в

двухслойной стержневой обмотке число эффективных проводников в пазу всегда равно двум ($u_п = 2$). При этом течение стержня может быть значительно большим,

чем сечение эффективного проводника в обмотке с многовитковыми катушками. В то же время число витков в фазе такой обмотки $w = Z/(ma)$ (m — число фаз, Z — число пазов, a число параллельных ветвей) и в трехфазных машинах не может быть более $Z/3$. Эти особенности (большое сечение эффективного проводника и малое число витков в фазе) определяют область применения стержневых обмоток — это статорные обмотки крупных электрических машин.

Стержневую обмотку применяют, в основном, в статорах мощных синхронных турбо- и гидрогенераторов, однако необходимость ее выполнения может возникнуть и при проектировании синхронных или асинхронных машин мощностью в несколько тысяч киловатт, т. е. в машинах с большими номинальными токами и большим магнитным потоком.

В обмотках статоров машин переменного тока протекает ток промышленной частоты, поэтому для уменьшения потерь на вихревые токи стержни выполняют не из массивных медных шин, а из многих изолированных между собой параллельных проводников, которые называют элементарными (рис. 3.9). Площадь поперечного сечения каждого элементарного проводника не должна превышать 17...20 мм^2. Суммарное сечение всех элементарных проводников, составляющих один стержень, равно сечению эффективного проводника.

Для уменьшения действия эффекта вытеснения тока элементарные проводники при сборке стержня переплетают между собой определенным образом так, чтобы каждый из них на протяжении пазовой части занимал попеременно все возможные положения по высоте стержня. Такое переплетение называют транспозицией [2, 6, 16].

В стержневых обмотках статоров машин высокого напряжения (см. рис. 3.9) корпусную изоляцию выполняют непрерывной и пропитывают в эпоксидных (класс нагревостойкости B)

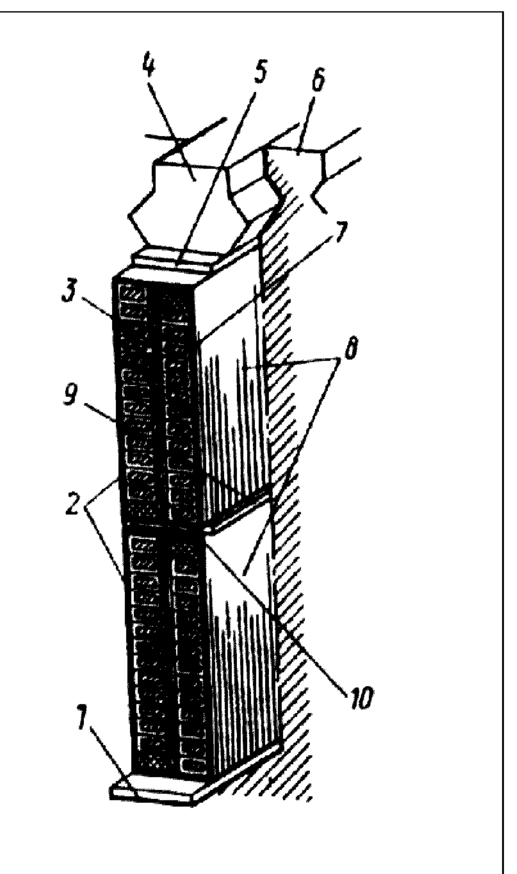


Рис. 3.9. Стержни обмотки в пазах статора:
1 — прокладки на дне паза; *2* — корпусная изоляция в стержне;
3 — элементарные проводники; *4* — пазовый клин;
5 — прокладка под клин; *6* — зубец статора;
7 — проводниковая изоляция элементарных проводников;
8 — стержни обмотки; *9* — прокладка между стержнями;
10 — прокладка между столбиками обмотки

Таблица 3.8. Непрерывная термореактивная изоляция классов нагревостойкости *B* и F обмоток статоров машин переменного тока на напряжение до 660 В

Часть обмотки	Позиция	Назначение изоляции	Материал			Число слоев	Двусторонняя толщина, мм, при числе проводников						
			Наименование	Марка	Толщина, мм		по ширине		по высоте				
							1	2	2	3	4	5	6
Пазовая	*1*	Витковая	Стеклянная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933)	ЛЭС	0,1	1 слой вполнахлеста	0,45	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7
			Разбухание изоляции от промазки лаком				0,05	0,1	0,1	0,15	0,20	0,25	0,3
	2	Корпусная	Стеклослюдинитовая лента	ЛСП-7	0,13	4 слоя вполнахлеста	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08
	3	Покровная	Стеклянная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933)	ЛЭС	0,2	1 слой вполнахлеста	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
			Всего изоляции в катушке				3,03	3,08	3,53	4,03	4,53	5,03	5,53
	4	Прокладка	Стеклотекстолит	СТЭФ-1	0,5	1	—	—	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	5	То же	То же	СТЭФ-1	1,0	1	—	—	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	6	«	«	СТЭФ-1	0,5	1	—	—	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
			Допуск на укладку				0,2	0,2	—	—	—	—	—
			Всего изоляции в пазу				3,23	3,28	9,06	10,06	11,06	12,06	13,06
Лобовая	*1*	Витковая	Стеклянная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933)	ЛЭС	0,1	1 слой вполнахлеста	0,45	0,45	0,9	1,35	1,8	2,25	2,7
			Разбухание изоляции				0,05	0,1	0,1	0,15	0,2	0,15	0,3
	7	Корпусная	Стеклослюдинитовая лента	ЛС-ПЭ-934-ТП	0,13	3 слоя вполнахлеста	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
	8	Покровная	Стеклянная лента (пропитанная в лаке ПЭ-933)	ЛЭС	0,2	2 слоя впритык	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
			Всего изоляции в лобовых частях				2,96	3,01	3,46	3,96	4,46	4,96	5,46

или битумных (класс нагревостойкости *E*) компаундах. Она имеет все отличительные свойства непрерывной компаундированной изоляции катушечной обмотки машин высокого напряжения, рассмотренные выше.

Особенностью конструкции изоляции высокого напряжения стержневых обмоток статоров машин переменного тока является отсутствие специальной витковой изоляции, так как при двух эффективных проводниках в пазу между ними находятся два слоя корпусной изоляции стержней. Это в значительной степени увеличивает надежность стержневых обмоток по сравнению с катушечными. Элементарные проводники стержней изготовляют из обмоточного провода марки ПСД и ПСДК. Для того чтобы иметь возможность произвести транспозицию элементарных проводников, их размещают в стержне в два столбика, между которыми располагают вертикальную прокладку из прочного в механическом отношении изоляционного материала (см. рис. 3.9) [2].

3.3. ОБМОТКИ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Обмотки фазных роторов асинхронных двигателей. В зависимости от мощности машины обмотки фазных роторов асинхронных двигателей выполняют из круглого или прямоугольного изолированного обмоточного провода, из неизолированной прямоугольной медной проволоки или из медных шин.

Обмотки из круглого провода применяют в роторах двигателей небольшой мощности. Они имеют такую же конструкцию и изоляцию, как и аналогичные обмотки статора.

Таблица 3.9. **Изоляция обмоток машин переменного тока с полуоткрытыми прямоугольными пазами на напряжение до 660 В**

Часть обмотки	Позиция	Материал				Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм	
		Наименование, марка			Толщина, мм		по ширине	по высоте
		Класс нагревостойкости						
		B	F	H				
Пазовая	*1*	Обволакивающее покрытие			0,05	1	0,2	0,2
	2	Бумага телефонная. Бумага фенилоновая лакированная бакелизированная			0,09	1,5 оборота	0,6	0,6
	3	Лакотканеслюдопласт						
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ	0,55	1	1,1	1,1
		Стеклотекстолит						
	4	СТ	СТЭФ	СТК	1,0	1	—	1,0
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5	1	—	0,5
		СТ	СТЭФ	СТК	0,5	1	—	0,5
		Допуск на укладку			—	—	0,3	0,6
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой и без клина)			—	—	2,2	4,5

Продолжение табл. 3.9

Часть обмотки	Позиция	Материал				Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм	
		Наименование, марка Класс нагревостойкости			Толщина, мм		по ширине	по высоте
		B	F	H				
Лобовая								
Полукатушки группы:		Скрепляющий бандаж из ленты стеклянной ЛЭС шириной 20 мм в двух местах			0,1	2,5 оборота	0,5	0,5
крайние	*1*	Обволакивающее покрытие			0,05	1	0,1	0,1
	7	Стеклолакоткань						
		ЛСБ-105/120	ЛСП-130/155	ЛСК-155/180	0,15	1 вполнахлеста	0,6	0,6
	8	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)					1,6	1,6
		Скрепляющий бандаж из ленты стеклянной ЛЭС шириной 20 мм в трех местах			0,1	2,5 оборота	0,5	0,5
средние	*1*	Обволакивающее покрытие			0,05	1	0,1	0,1
		Общая толщина изоляции полукатушки (без витковой)			—	—	0,6	0,6

Обмотки роторов из прямоугольного обмоточного провода выполняют в двигателях мощностью до 100 кВт. Предварительно намотанные, растянутые и отрихтованные катушки укладывают в открытые прямоугольные пазы ротора. Конструкция пазовой изоляции (табл. 3.10) такая же, как и в статорах машин с номинальным напряжением до 660 В, т. е. представляет собой пазовый короб, состоящий из нескольких слоев изоляционного материала. Лобовые части изолируют ленточным материалом, причем на лобовые части крайних катушек в катушечных группах накладывают усиленную изоляцию по сравнению со средними катушками в группе, чем достигается надежность изоляции между фазами обмотки ротора.

Таблица 3.10. Изоляция катушечной обмотки фазных роторов асинхронных двигателей мощностью до 100 кВт класса нагревостойкости В

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал			Количество слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм	
		Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Пазовая		Разбухание изоляции от промазки лаком	—	—	—	—	0,1	0,1
	1	Стеклянная лента	ЛЭС	0,1	1 слой вразбежку		0,2	0,2
		Всего на одну катушку	—	—	—	—	0,3	0,3
	2	Стеклолакоткань	ЛСБ	0,2	2	3	0,4	0,6
	3	Гибкий миканит	ГФС	0,2	2	3	0,4	0,6
	4	Стеклолакоткань	ЛСБ	0,2	2	3	0,4	0,6
	5	Стеклотекстолит	СТ	0,5	—	1	—	0,5
	6	То же	СТ	0,5	—	1	—	0,5
	7	«	СТ	0,5	—	1	—	0,5
		Допуск на укладку	—	—	—	—	0,5	0,8
		Всего на паз без клина	—	—	—	—	2	4,7

Продолжение таблицы 3.10

Часть обмотки		Позиция на рисунке	Материал			Количество слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм	
			Наименование	Марка	Толщина, мм	по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
Лобовая	Средние катушки в катушечной группе	*8*	Стеклянная лента	ЛЭС	0,2	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8
	Крайние катушки в катушечной группе	*9*	Стеклолакоткань	ЛСБ	0,2	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8
		10	Стеклянная лента	ЛЭС	0,2	1 слой вполнахлеста		0,8	0,8
			Толщина изоляции крайних катушек	—	—	—	—	1,6	1,6

Стержневые обмотки фазных роторов асинхронных двигателей применяют в машинах мощностью более 100 кВт, а в некоторых исполнениях — начиная с мощности 40...50 кВт. Обмотки выполняют из прямоугольной шинной меди. Механическая жесткость стержней дает возможность выполнить пазы ротора полузакрытыми с узкой прорезью, что способствует улучшению рабочих характеристик двигателей. Стержни вставляют в пазы с торца ротора, поэтому до укладки изгибают только одну лобовую часть стержня. Вторую лобовую часть изгибают после установки стержня на место в паз [2].

Конструкция изоляции стержневых обмоток роторов приведена в табл. 3.11. В этой таблице даны два значения числа слоев и толщины изоляции в зависимости от напряжения на контактных кольцах ротора, которое определяется обмоточными данными машины.

Гильзы для роторных стержней изготовляют из микафолия, стекломикафолия или из листовых материалов на основе слюдинитов: слюдинитофолия, стеклослюдинитофолия. В качестве связующих для изготовления гильз применяют термореактивные лаки. Лобовые части стержней изолируют ленточными материалами. Слабым в электрическом отношении местом изоляции роторных стержней, так же как и в катушечных обмотках статоров с гильзовой изоляцией, является место стыка двух видов изоляции — гильзовой на пазовой части и непрерывной на лобовой.

Таблица 3.11. **Изоляция стержневых обмоток фазных роторов асинхронных двигателей с высотой оси вращения ≥ 280 мм**

Часть обмотки	Позиция на рисунке	Материал							Напряжение до 750 В		Напряжение до 1200 В			
		Наименование, марка			Толщина, мм		Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм		Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм	
		Класс нагревостойкости			Класс нагревостойкости		Класс нагревостойкости		по ширине	по высоте	Класс нагревостойкости		по ширине	по высоте
		B	F	H	*B*	F и H	*B*	F и H			*B*	F и H		
Пазовая	*1*	Стеклослюдопластифолий ИФГ-Б	Синтофолий — F	Синтофолий — H	0,15	0,16	4,5* оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	9,5* оборота	7,5 оборота	2,4	4,5
		Стеклолакоткань												
	2	ЛСБ-105/120	ЛСП-130/155	ЛСК-155/180	0,15		1		0,3	0,3	1	1	0,3	0,3
		Стеклотекстолит												
	3	СТ	СТЭФ-1	СТК	0,5		1		—	0,5	1	1		0,5
	4	СТ	СТЭФ-1	СТК	0,5		1		—	0,5	1	1	—	0,5
	5	СТ	СТЭФ-1	СТК	0,5		1		—	0,5	1	1	—	0,5
		Допуск на укладку обмотки			—		—		0,3	0,5	—	—	0,3	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без клина)							1,7	4,5			3	6,6
Лобовая	*6*	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-934-ТП	Пленка полиимидная 0,05×3 = 0,15		0,15		1 слой вполнахлеста		0,6	0,6	2 слоя вполнахлеста		1,2	1,2
	7	Стеклянная лента ЛЭС			0,1		1 слой вполнахлеста		0,4	0,4	2 слоя вполнахлеста		0,8	0,8
		Общая толщина изоляции стержня в лобовой части							1,0	1,0			2,0	2,0

* С учетом усадки на 15…20%

Для того чтобы увеличить электрическую прочность изоляции этого участка, его изолируют с постепенным переходом от гильзовой к непрерывной изоляции по типу конуса или обратного конуса.

Изоляцию стержней фазных роторов для двигателей некоторых типоразмеров выполняют непрерывной из ленточного материала по всей длине стержня с последующей опрессовкой и запечкой изоляции в горячих прессах.

Короткозамкнутые обмотки. В роторах асинхронных двигателей широко распространены короткозамкнутые обмотки. Они также применяются как демпферные и пусковые в роторах синхронных машин.

Основное их отличие от всех остальных обмоток электрических машин заключается в отсутствии изоляции между пазовой частью обмотки и стенками паза. Встречающиеся иногда m- фазные изолированные и замкнутые накоротко обмотки роторов асинхронных машин специального исполнения здесь не рассматриваются.

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей делятся по конструкции и технологии изготовления на два типа: сварные и литые (рис. 3.10).

Демпферные и пусковые обмотки синхронных машин выполняют только сварной конструкцией. Стержни обмоток в подавляющем большинстве случаев круглого сечения располагают в пазах полюсных наконечников.

Демпферные обмотки синхронных двигателей более мощные, чем синхронных генераторов, так как их используют так же, как и пусковые. У генераторов демпферные обмотки выполняют из меди. В двигателях для улучшения пусковых характеристик часто применяют латунь.

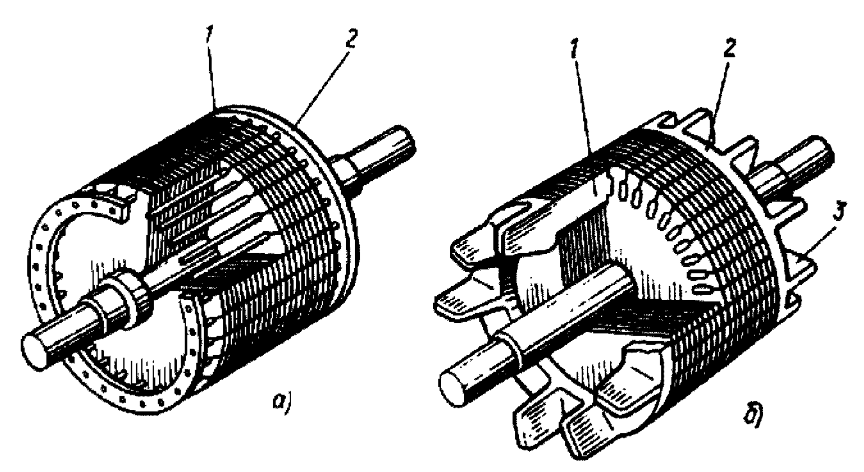


Рис. 3.10. Короткозамкнутые роторы асинхронных двигателей:
а — со вставными стержнями; *б* — с литой обмоткой;
1 — стержни обмотки; *2*—замыкающие кольца;
3 — вентиляционные лопатки

3.4. КОЭФФИЦИЕНТ ЗАПОЛНЕНИЯ ПАЗА

Зубцовая зона — наиболее напряженный в магнитном отношении участок магнитопровода, поэтому при проектировании машин стремятся выбрать наименьшие размеры пазов, обеспечивающие размещение в них необходимого числа проводников и изоляции. Степень использования объема паза для размещения меди обмотки оценивается коэффициентом заполнения паза медью $k_М$, представляющим собой отношение суммарной площади поперечного сечении всех проводников в пазу к площади поперечного сечения паза «в свету» $S_П$:

$$k_{\text{м}} = q_{\text{эл}} n_{\text{эл}} u_{\text{п}} / S_{\text{п}}, \qquad (3.1)$$

где $q_{\text{эл}}$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника; $n_{\text{эл}}$— число элементарных проводников в одном эффективном; $u_{\text{п}}$ — число эффективных проводников в пазу.

Коэффициент $k_{\text{м}}$ зависит от общего количества изоляции в пазу, т. е. от толщины корпусной, витковой и проводниковой изоляции и наличия различных изоляционных прокладок. При возрастании толщины изоляции, например, в машинах с более высоким номинальным напряжением или при использовании худших изоляционных материалов, коэффициент заполнения паза медью уменьшается. Это приводит к ухудшению использования пазового пространства, а следовательно, и всей зубцовой зоны машины.

Средние значения $k_М$ для современных электрических машин в зависимости от номинального напряжения и типа обмоток приведены в табл. 3.12.

Таблица 3.12. **Средние значения коэффициента заполнения паза медью** $k_М$

Тип обмотки	Коэффициент $k_М$
Обмотки из круглого провода с эмалевой изоляцией на напряжение до 660 В	0,3
Обмотки из прямоугольного провода на напряжение 3000 В (провод марки ПСД)	0,22…0,37
Обмотки из прямоугольного провода на напряжение 6000 В	0,14…0,25

Для машины с обмотками из прямоугольных проводов $k_М$ можно рассчитать достаточно точно, так как при проектировании заранее определяют местоположение каждого проводника в пазу.

В обмотках из круглого провода положение каждого проводника в пазу заранее определить нельзя. Кроме того, плотность размещения проводников в пазу непостоянна. Она зависит от усилий, прикладываемых обмотчиком при уплотнении проводников по мере укладки их в пазы. Опытом установлено, что при чрезмерно большой плотности укладки круглых проводов трудоемкость обмоточных работ неоправданно возрастает, а надежность обмотки резко ухудшается из-за возникающих при этом механических повреждений проводниковой изоляции.

Плотность укладки проводников в пазы оценивается технологическим коэффициентом заполнения проводниками свободной от изоляции площади поперечного сечения паза:

$$k_З = d^2_{ИЗ} n_{ЭЛ} u_П / S'_П . \qquad (3.2)$$

Числителем этого выражения является произведение площади квадрата, описанного вокруг изолированного элементарного проводника с диаметром $d_{ИЗ}$ на число всех элементарных проводников в пазу $n_{ЭЛ} u_П$, а знаменателем — площадь поперечного сечения паза, свободная от изоляции $S'_П$ т. е. та площадь, в которой располагаются проводники обмотки. Коэффициент $k_З$ обычно называют коэффициентом заполнения паза. Он характеризует только технологичность укладки обмотки из круглого провода, а не степень использования объема паза для размещения проводников обмотки. Так, при одной и той же плотности укладки обмотки $k_З$ будет одинаков для обмоток машин с разной толщиной пазовой или проводниковой изоляции, при двухслойной или однослойной обмотках и т. п.

В современном электромашиностроении плотность укладки обмотки стремятся выполнить такой, чтобы $k_З$ был в пределах 0,7…0,75, причем меньшие значения — в машинах с числом полюсов, равным двум.

Следует отметить, что увеличение числа элементарных проводников в одном

эффективном, т. е. применение обмоточного провода меньшего диаметра при прежней площади эффективного проводника, приводит к некоторому возрастанию коэффициента заполнения, и наоборот. Это объясняется тем, что толщина изоляции обмоточного провода остается постоянной при сравнительно больших изменениях диаметра круглых обмоточных проводов (см. приложение П3).

3.5. ЭЛЕМЕНТЫ СХЕМ И ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЫВОДОВ ТРЕХФАЗНЫХ ОБМОТОК

Основным элементом обмотки электрической машины является виток. Несколько последовательно соединенных витков, находящихся в одних и тех же пазах, объединяют между собой общей корпусной изоляцией, в результате чего образуется катушка обмотки. Каждую из сторон катушки располагают в одном пазу. Если весь паз занят стороной только одной катушки (стороны катушек располагают в один слой), то обмотку называют однослойной. Если в каждом пазу размещены стороны двух катушек, одна над другой, то обмотку называют двухслойной.

Несколько последовательно соединенных в соседних пазах, образуют катушечную группу, представляющую собой обмотку полюса или пары полюсов одной из фаз машины. Число катушек в катушечной группе обозначают q. Так как q катушек располагают в соседних пазах, то одноименные стороны этих катушек занимают q пазов, образующих обмотку полюса одной фазы машины.

В одной катушечной группе все катушки могут быть соединены только последовательно, так как векторы ЭДС катушек, находящихся в различных пазах, сдвинуты относительно друг друга на пазовый угол и при параллельном соединении возникают большие уравнительные токи. Параллельное соединение катушек в одной группе применяют в некоторых обмотках крупных двухполюсных турбогенераторов.

Несколько соединенных между собой катушечных групп образуют фазу обмотки. Катушечные группы в фазе соединяются последовательно, параллельно или смешанно, последовательно-параллельно. Количество катушечных групп в каждой из фаз зависит от числа полюсов и типа обмотки. Число параллельных ветвей при соединении катушечных групп определяют при расчете обмоток.

Концы фаз в большинстве случаев внутри машины не соединяют, а подводят к зажимам коробки выводов все начала и все концы фаз, что позволяет включать машины на два напряжения сети, соединяя фазы в звезду или в треугольник. Напряжение, приходящееся на фазу обмотки статора, при этом не изменяется.

Изображение схемы обмотки. Порядок соединения между собой отдельных катушек, катушечных групп и фаз обмотки задают в технической документации в виде чертежа, который называют схемой обмотки. При вычерчивании схем принят ряд условностей: чертеж с изображением схемы обмотки выполняется без соблюдения масштаба и не отражает никаких соотношений размеров машины и обмотки и ее частей; каждая катушка изображается одной линией независимо от числа витков в ней и элементарных проводников в каждом эффективном проводнике; все катушки изображают в одной плоскости и т. п.

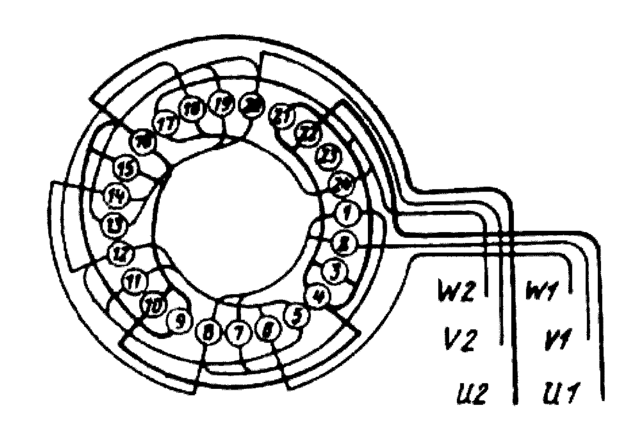


Рис. 3.11. Торцевая схема однослойной концентрической обмотки
$z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$

Известны несколько способов изображения схем, из которых наибольшее распространение получили так называемые развернутые и торцевые схемы. Торцевая схема представляет собой как бы вид с торца на обмотанный сердечник (рис. 3.11). На ней хорошо прослеживаются положения лобовых частей катушек, но недостаточно места для изображения межкатушечных и межгрупповых соединений, что неудобно в сложных схемах, имеющих несколько параллельных ветвей.

Развернутые схемы представляют собой развертку статора или ротора с обмоткой и позволяют показать все соединения между элементами обмотки — катушками и катушечными группами.

Фазная зона. Стороны катушек одной катушечной группы распределены в q лежащих друг за другом пазах. В симметричной m-фазной обмотке на каждом полюсном делении таких групп будет m по q пазов в каждой. Следовательно, стороны катушек, принадлежащих одной фазе, расположены на каждом полюсном делении τ в пазах, занимающих 1/m-ю его часть, или $[\pi D/(2pm)\ \ \tau/m]$-ю часть окружности зазора, называемую фазной зоной. В обмотках трехфазных машин, построенных по такому принципу, фазная зона занимает дугу окружности, содержащую электрический угол $\tau/m = 180°/3 = 60°$, поэтому такие обмотки называют обмотками с 60-градусной фазной зоной.

Иногда применяют обмотки, в которых mq пазов располагают на двух полюсных делениях. Фазная зона таких обмоток занимает 2τ/m-ю часть окружности, что соответствует электрическому углу 120° в трехфазных машинах. Такие обмотки называют обмотками с 120-градусной фазной зоной.

В большинстве трехфазных машин общего назначения применяют обмотки с 60-градусной фазной зоной. Однако встречаются и машины с

обмотками, имеющими 120-градусную фазную зону. Например, в многоскоростных асинхронных двигателях с полюсно-переключаемой обмоткой при включении на большее число полюсов обмотка имеет 60-градусную фазную зону, а при включении на работу с меньшим числом полюсов — 120-градусную фазную зону.

Ниже рассматриваются наиболее распространенные схемы обмоток с 60-градусной фазной зоной. Принципиально схемы обмоток со 120-градусной фазной зоной не отличаются от рассматриваемых ниже, однако при их составлении и расчете обмоточных коэффициентов необходимо учитывать особенности этого вида обмоток.

Обозначение выводов обмоток трехфазных машин. В настоящее время действуют две системы обозначений выводов обмоток электрических машин. Одна из них, установленная ГОСТ 183—74, сохраняется для разработанных до 1987 г. и модернизируемых машин. Выводы обмоток этих машин обозначают буквами русского алфавита: обмоток статора — С, обмоток ротора асинхронных двигателей — Р, обмоток возбуждения синхронных машин — И. Цифрами после букв обозначают начала и концы фаз: первой фазы соответственно 1 и 4, второй фазы 2 и 5, третьей фазы 3 и 6. В табл. 3.13 приведены установленные ГОСТ 183—74 обозначения в зависимости от числа выводов и схемы соединения обмоток. Обозначения должны быть нанесены непосредственно на концы выводов: на кабельные наконечники, шинные концы или специальные обжимы, плотно закрепленные на выводах.

Таблица 3.13. Обозначения выводов обмоток электрических машин переменного тока, разработанных до 1987 г. и модернизируемых (ГОСТ 183 – 74)

Наименование и схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение выводов	
			начало	конец
Обмотка статора: Открытая схема	6	Первая фаза	С1	С4
		Вторая фаза	С2	С5
		Третья фаза	С3	С6
Соединение звездой	3 или 4	Первая фаза	С1	
		Вторая фаза	С2	
		Третья фаза	С3	
		Нулевая точка	0	
Соединение треугольником	3	Первый вывод	С1	
		Второй вывод	С2	
		Третий вывод	С3	
Обмотка возбуждения (индукторов) синхронных машин	2		И1	И2
Обмотка фазного ротора асинхронных двигателей	3	Первая фаза	Р1	
		Вторая фаза	Р2	
		Третья фаза	Р3	

Продолжение табл. 3.13

Наименование и схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение выводов
Схема звезда	4	Первая фаза	P1
		Вторая фаза	P2
		Третья фаза	P3

Примечания: 1. В чертежах электрических схем соединения обмоток с 6 выводными концами (в рисунках на свободном поле схемы) допускается применение двойных обозначений (C1C6; C2C4; C3C5) при соединении фаз в треугольник и тройного обозначения (C4C5C6) точки звезды (нулевой точки) при соединении фаз в звезду.

2 .Выводы составных и секционированных обмоток статором машин следует обозначать теми же буквами, что и простые обмотки, но с дополнительными цифрами впереди букв. Например, выводы первой обмотки (первой секции) первой фазы; начало 1C1, конец 1C4, выводы второй обмотки (секции) первой фазы: начало 2C1, конец 2C4.

3. Контактные кольца ротора асинхронных двигателей обозначают также, как присоединенные к ним выводы обмотки ротора, при этом расположение колец должно быть в порядке цифр, указанных в таблице, а кольцо 1, соединенное с выводом P1, должно быть наиболее удаленным от обмотки ротора.

В машинах малых размеров, в которых буквенно-цифровые обозначения затруднены из-за недостатка места, ГОСТ разрешает использовать цветовые обозначения (табл. 3.14) проводами с разноцветной изоляцией, красками и т. п.

Таблица 3.14. Цветовое обозначение выводов обмоток статора трехфазных машин переменного тока

Схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Цветовой код выводов	
			начало	конец
Открытая схема	6	Первая фаза	Желтый	Желтый с черным
		Вторая фаза	Зеленый	Зеленый с черным
		Третья фаза	Красный	Красный с черным
Звезда	3 или 4	Первая фаза	Желтый	-
		Вторая фаза	Зеленый	-
		Третья фаза	Красный	-
		Нулевая точка	Черный	-
Треугольник	3	Первый вывод	Желтый	-
		Второй вывод	Зеленый	-
		Третий вывод	Красный	-

Для машин, разработанных после 1 января 1987 г., установлена система обозначений выводов обмоток (ГОСТ 26772—85), соответствующая международным стандартам. По этой системе (табл. 3.15) выводы обозначают буквами латинского алфавита: первой фазы обмотки статора — буквой U, второй фазы — буквой V, третьей фазы — буквой W;· выводы обмотки ротора соответственно по фазам — буквами K, L и M;· выводы обмотки возбуждения синхронных машин — буквой F. Начала и концы фаз обозначаются соответствен*о* цифрами 1 и 2, стоящими после букв. При наличии промежуточных выводов они обозначаются буквой, определяющей фазу, и последующими цифрами: 3, 4 и т. д.

Таблица 3.15. Обозначение выводов обмоток электрических машин переменного тока, разработанных после 1.01.1987 г. (ГОСТ 26772—85)

Наименование и схема соединения обмотки	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение выводов	
			начало	конец
Обмотка статора:				
открытая схема	6	Первая фаза	UI	U2
		Вторая фаза	V1	V2
		Третья фаза	Wl	W2
соединение в звезду	3 или 4	Первая фаза	U	
		Вторая фаза	V	
		Третья фаза	W	
		Точка звезды	*N*	
соединение в треугольник	3	Первый вывод	U	
		Второй вывод	V	
		Третий вывод	W	
секционированная обмотка	12	Первая фаза	U1	U2
		Выводы от первой фазы	U3	U4
		Вторая фаза	VI	V2
		Выводы от второй фазы	V3	V4
		Третья фаза	WI	W2
		Выводы от третьей фазы	W3	W4
расщепленные обмотки, предназначенные для последовательного или параллельного включения	-	Первая фаза	U1	U2
			U5	U6
		Вторая фаза	VI	V2
			V5	V6
		Третья фаза	W1	W2
			W5	W6
раздельные обмотки, предназначенные для последовательного или параллельного включения	_	Первая фаза	1U1	1U2
			2U1	2U2
		Вторая фаза	1V1	1V2
			2VI	2V2
		Третья фаза	IW1	IW2
			2WI	2W2
Обмотка фазного ротора асинхронного двигателя:				
открытая схема	6	Первая фаза	KI	K2
		Вторая фаза	L1	L2
		Третья фаза	Ml	M2
соединение в звезду	3 или 4	Первая фаза	K	
		Вторая фаза	L	
		Третья фаза	M	
		Точка звезды	*Q*	
соединение в треугольник	3	Первый вывод	K	
		Второй вывод	L	
		Третий вывод	M	
Обмотка возбуждения синхронных машин	2	-	F1	F2

Цветовые обозначения выводов обмоток для машин, в которых буквенно-цифровые обозначения затруднены, сохраняют такими же, как и при прежней системе обозначений (см. табл. 3.14).

Обозначения должны наноситься на начала и концы обмоток или на колодку зажимов рядом с выводами. Если соединения фаз произведены внутри корпуса машины, например, обмотка статора постоянно соединена в треугольник, то начала и концы фаз не обозначают, а на выведенные концы обмотки наносят буквенные обозначения без цифр. Также опускают цифры в обозначении выводов фаз обмоток, соединенных внутри машины в звезду. Если в обмотке имеется вывод от нулевой точки (точка звезды), он обозначается в обмотке статора буквой *N*, в обмотке ротора буквой *Q*.

На схемах обмоток обычно обозначают все начала и концы фаз, причем на свободном поле схемы допускается применение двойных или тройных обозначений точек соединения разных фаз. Например, точки соединений фаз обмотки в треугольник могут быть обозначены U1W2. V1U2, W1V2, а выводы от этих точек — соответственно U, V и W. При соединении обмоток в звезду на схемах допускается обозначение начал фаз UI, VI, W1 и точек соединения фаз внутри машины U2, V2, W2.

Расположение выводов фаз. Стороны катушек, с которыми соединяют начала фаз обмоток, должны располагаться в пазах, между которыми заключается такой же электрический угол, как и между фазами питающей сети, т. е. 2/πm радиан или 2πk/m радиан, где k — любое целое число, не кратное m. В трехфазных машинах это 120° · k, где k — не кратное трем. При k, кратном трем, в таких пазах располагают стороны катушек, принадлежащих одной и той же фазе. Учитывая, что пазовый угол αz $2\pi p/Z$, получаем, что начальные стороны первых катушек разных фаз должны быть расположены через

$$\frac{2\pi k/m}{2\pi p/Z}=\frac{Zk}{pm}=2qk \text{ пазов}$$

В обмотках статоров для уменьшения длины выводных концов выводы стремятся расположить как можно ближе один к другому. Для этого принимают k = 1 и начала фаз располагают через $2q$ пазов друг от друга.

В обмотках фазных роторов асинхронных двигателей, чтобы избежать дисбаланса, который появится при неравномерном расположении начал фаз, начала фаз стремятся расположить симметрично по окружности ротора, т. е. через Z/m пазов (при этом k = p). Симметричное расположение выводов обмоток возможно лишь при числе полюсов машины, не кратном трем. При p, кратном трем, например в машинах с 2p 6, 12 и т. д., симметрично расположить выводы обмотки фазного ротора не удается, и схемы обмоток усложняются.

3.6. ОБМОТОЧНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ

Обмоточный коэффициент $k_{об}$ учитывает уменьшение ЭДС распределенной обмотки по сравнению с ЭДС обмотки с тем же числом витков, но имеющих диаметральный шаг и сосредоточенных в одной катушке на каждом полюсе. Для любой обмотки $k_{об}$ может быть найден по векторной диаграмме ЭДС проводников (звезде пазовых ЭДС) как отношение геометрической суммы векторов ЭДС проводников, последовательно соединенных в фазу обмотки (ЭДС фазы), к алгебраической сумме ЭДС этих же проводников [5]:

$$k_{об} = \frac{\sum_{i=1}^{n} e_{прi}}{n\, e_{пр}} \qquad (3.3)$$

где $e_{пр}$ — ЭДС эффективного проводника; n — число последовательных эффективных проводников обмотки.

Общим аналитическим выражением для расчета $k_{об}$ большинства современных симметричных обмоток с фазной зоной, равной электрическому углу π/m радиан, и с целым числом пазов на полюс и фазу (кроме некоторых видов специальных обмоток, например с несплошной фазной зоной и ряда других) является

$$k_{об} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2m}\nu)}{q\sin(\frac{\pi}{2mq}\nu)}\sin(\frac{\pi}{2}\beta\nu) \qquad (3.4)$$

где ν — номер гармоники ЭДС (для основной гармоники $\nu = 1$); q — число пазов на полюс и фазу; β — относительный шаг обмотки (укорочение или удлинение шага по сравнению с полюсным делением).

Для расчета и анализа обмоток $k_{об}$ удобно представлять в виде произведения коэффициента укорочения $k_у$ на коэффициент распределения $k_Р$:

$$k_{об} = k_у\, k_р. \qquad (3.5)$$

Коэффициент укорочения. Этот коэффициент учитывает уменьшение ЭДС каждого витка по сравнению с алгебраической суммой ЭДС двух проводников, являющихся его сторонами, т. е. по сравнению с ЭДС витка при диаметральном шаге,

$$k_у = \sin(\frac{\pi}{2}\beta) \qquad (3.6)$$

т.е он зависит от основного шага витка – его укорочения (или удлинения) по сравнению с полюсным делением машины: $\beta = y/\tau$.

В равнокатушечной обмотке, в которой все катушки имеют одинаковый шаг и одинаковое число витков, коэффициент укорочения обмотки будет

равен коэффициенту укорочения витка, постоянному для всех витков обмотки. В обмотках с разными шагами катушек или с разным числом витков в катушках, например, в концентрических или одно-двухслойных, укорочение витков разных катушек, уже не будет одинаковым. Поэтому для расчета коэффициента укорочения фазы обмотки пользуются не действительным шагом катушек у, а расчетным $y_{расч}$, который для различных типов обмоток определяется следующим образом.

Для двухслойных обмоток, в которых шаги всех катушек по пазам одинаковы, т. е. для всех двухслойных обмоток, за исключением двухслойных концентрических, расчетный шаг равен реальному шагу катушек по пазам:

$$y_{расч} = y.$$

Для двухслойных концентрических обмоток расчетный шаг равен среднему шагу катушек в катушечной группе:

$$y_{расч} = (y_б + y_м)/2 \qquad (3.7)$$

где $y_б$ и $y_м$ — шаги по пазам наибольшей и наименьшей катушек в катушечной группе.

Для одно-двухслойных обмоток, в которых часть катушек имеет удвоенное число витков по сравнению с остальными, расчетный шаг определяется в зависимости от числа таких катушек и от числа пазов на полюс и фазу:

$$y_{расч} = q(m-1) + 2N_б \qquad (3.8)$$

где $N_б$ — число катушек с удвоенным числом витков в каждой катушечной группе.

В трехфазных машинах ($m = 3$) наибольшее распространение среди одно-двухслойных обмоток получили обмотки с одной большой катушкой (катушкой с удвоенным числом витков — $N_б = 1$). Для таких обмоток выражение для определения расчетного шага упрощается:

$$y_{расч} = 2(q + 1) \qquad (3.9)$$

Для всех однослойных обмоток со сплошной фазной зоной, которые наиболее часто применяют в трехфазных машинах, расчетный шаг постоянен и равен полюсному делению:

$$y_{расч} = \tau \qquad (3.10)$$

Из этого следует, что коэффициент укорочения однослойных обмоток со сплошной фазной зоной всегда равен единице ($k_y = 1$), несмотря на то, что отдельные катушки обмотки при $q > 1$ выполняют с шагами большими, меньшими или равными полюсному делению.

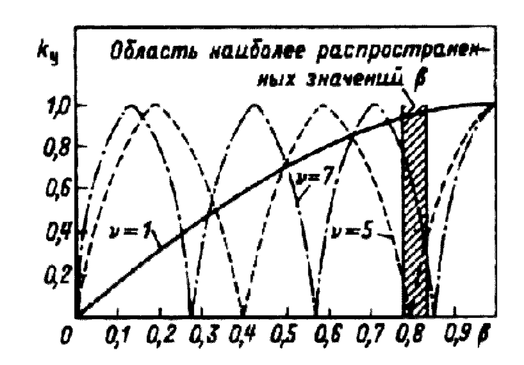


Рис. 3.12. Изменение коэффициента укорочения для различных гармоник в зависимости от β

В общем случае коэффициент укорочения для всех перечисленных выше типов обмоток для любой гармоники [5]

$$k_{y\nu} - \sin(\frac{\pi}{2}\beta\nu) \qquad (3.11)$$

Укорочение шага рассчитывают по шагу обмотки $y_{расч}$.

$$\beta \quad y_{расч}/\tau \qquad (3.12)$$

Расчетный шаг для различных типов обмоток определяют по (3.6)—(3.11).

На рис. 3.12 приведены кривые изменения k_ν и показана область наиболее распространенных в практике значений укорочения (β = 0,79—0,83), при которых достигают значительного уменьшения ЭДС пятой и седьмой гармоник ($\nu = 5$ и $\nu = 7$) при относительно малом уменьшении ЭДС первой гармоники. В практике почти все машины, кроме машин малой мощности, выполняют с обмоткой, имеющей укороченный шаг в показанных на рисунке пределах.

Следует отметить, что в отдельных случаях возникает необходимость применения обмоток с укорочением шага до 0,5τ ,например, в мощных двухполюсных машинах с обмоткой из жестких катушек. При укорочении β ≈ 0,8 ширина катушек такой обмотки больше, чем внутренний диаметр статора, почти на двойную глубину паза и укладка их в пазы чрезвычайно затруднена, а в некоторых случаях просто невозможна. Чтобы избежать такого положения, обмотку выполняют с укорочением, близким к β = 0,58 — 0,63, при этом ширина катушек уменьшается и обмотка может быть уложена в пазы.

Коэффициент распределения. Представим себе, что обмотка полюса электрической машины образована q катушками, стороны которых помещены в одних и тех же больших пазах (рис. 3.13, а). Кривая МДС такой сосредоточенной обмотки близка к прямоугольной, и, помимо первой гармоники, в ней присутствует целый спектр гармоник высших порядков.

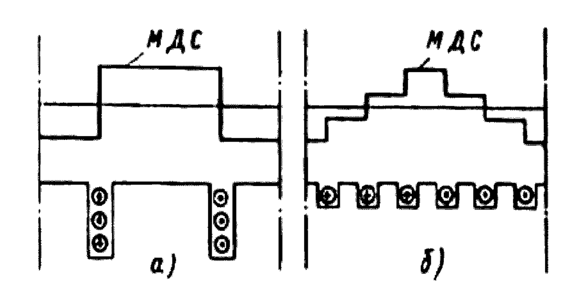


Рис. 3.13. Кривые МДС сосредоточенной и распределенной обмоток

Если эти катушки расположить по одной в q соседних пазах, то кривая их МДС (рис. 3.13, б) будет представлять собой ступенчатую трапецию. Гармонический анализ показывает, что высшие гармоники в ней значительно менее выражены, чем в прямоугольной кривой.

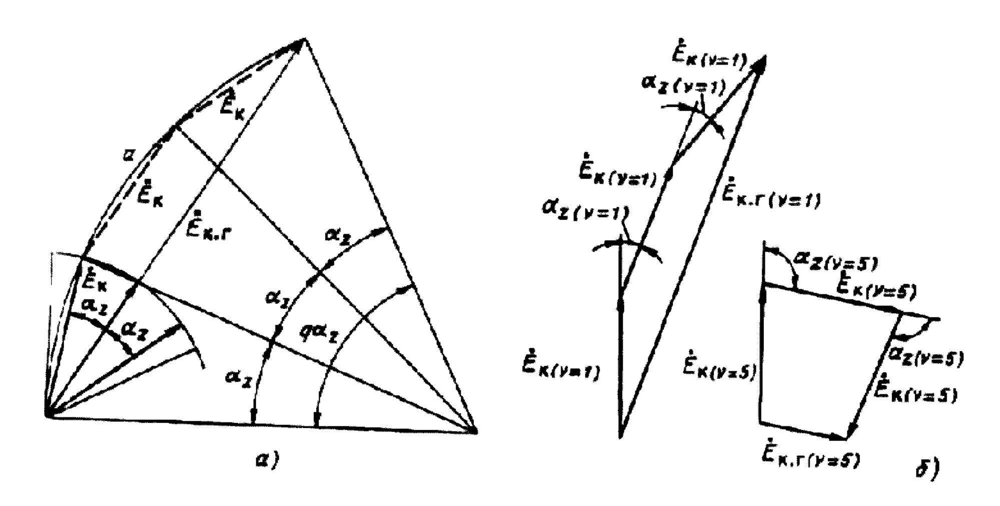


Рис. 3.14. К расчету коэффициента распределения обмотки:
а – векторная диаграмма ЭДС катушек при q = 3; *б* – ЭДС катушечной группы 1-й и 5-й гармоник

Однако суммарная ЭДС распределенной обмотки будет меньше, чем сосредоточенной. Оси распределенных в q соседних пазах катушек сдвинуты относительно друг друга на электрический угол $\alpha z = 2\pi p / Z$ радиан. Векторы ЭДС сдвинуты между собой на этот же угол, поэтому суммарная ЭДС катушечной группы будет равна не алгебраической, а геометрической сумме ЭДС всех катушек, входящих в группу, т. е. $\dot{E}_{\text{кг}} = |\sum \dot{E}_{\text{к}}|$ (рис. 3.14, а). Отношение $\dot{E}_{\text{к.г}}$ распределенной обмотки к расчетной ЭДС, равной произведению числа катушек на ЭДС каждой из них $q\dot{E}_{\text{к}}$, называют коэффициентом распределения $k_p = \dot{E}_{\text{кг}} / (q\dot{E}_{\text{к}})$.

Из рис. 3.14, а видно, что коэффициент распределения для первой гармоники трехфазных машин равен:

$$k_{\text{р}} = \frac{\sin\frac{\pi}{2}}{q\sin\frac{\pi}{2mq}} = \frac{0{,}5}{q\sin\frac{30^\circ}{q}} \qquad (3.13)$$

Для высших гармоник пазовый угол $\alpha_{Z\nu}$ зависит от порядка гармоники:

$$\alpha_{Z\nu} = \frac{2\pi . p}{Z}\nu = \frac{\pi}{mq}\nu, \qquad (3.14)$$

поэтому коэффициент распределения в общем случае при целом числе q для любой из гармоник [6]

$$k_{\text{р}\nu} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2m}\nu)}{q\sin(\frac{\pi}{2mq}\nu)} = \frac{0{,}5}{q\sin\frac{30^\circ}{q}} \qquad (3.15)$$

Анализ этого выражения показывает, что при q 1 для всех гармоник k_p 1. С увеличением числа q коэффициент распределения уменьшается до определенных пределов, соответствующих абсолютному равномерному распределению проводников обмотки по дуге полюсного деления (q ∞). Уменьшение k_p происходит по-разному для различных гармоник. Как видно из табл. 3.16, для первой гармоники он уменьшается до значения k_p = 0,955, а для высших гармоник уменьшается значительно быстрее.

Таблица 3.16 Коэффициент распределения k_p трехфазных обмоток с фазной зоной 60°.

Номер гармоники	Число пазов на полюс и фазу q					
	2	3	4	5	6	∞
1	0,966	0,96	0,958	0,957	0,957	0.955
5	0,259	0,217	0,205	0,2	0,197	0,191
7	0,259	0,177	0,158	0,149	0,145	0,136
11	0.966	0,177	0,126	0,11	0,102	0,087
13	0,966	0,217	0,126	0,102	0,084	0,073
17	0,259	0,96	0,158	0,102	0,84	0,056
19	0,259	0,96	0,205	0,11	0,084	0,05
23	0,966	0,217	0,958	0,149	0,092	0,041
25	0,966	0,177	0,958	0,2	0,102	0,038
29	0,259	0,177	0,205	0,957	0,145	0,033
31	0,259	0,217	0,158	0,957	0.197	0,051
35	0,966	0,96	0,126	0,2	0.957	0,027
37	0,966	0,96	0,126	0,149	0,957	0,026
41	0,259	0,217	0,158	0,11	0,157	0,022
47	0,966	0,177	0,958	0,102	0,102	0,020

На рис. 3.14, *б* приведено графическое определение $\dot{E}_{кг}$ для первой и пятой гармоник при q 3. Так как угол между векторами ЭДС пятой гармоники в 5 раз больше, чем для первой, сумма векторов ЭДС этой гармоники трех катушек, составляющих катушечную группу будет значительно меньше, чем ЭДС первой гармоники.

Коэффициент скоса пазов. Для гармоник $\nu_z = \frac{Z}{p} K \pm 1$ (для трехфазных машин $\nu_z = 6qK \pm 1$, где k – 1, 2, 3 ..., при k – 1 их порядок близок к цифре, выражающей число зубцов, приходящихся на пару полюсов машины, $\nu \approx Z/p$.

Такие гармоники называют гармониками зубцового порядка. Анализ выражений (3.11) и (3.15) показывает, что значения коэффициентов

укорочения и распределения этих гармоник будут такими же, как и для первой гармоники, при любых укорочениях и любом числе q (см. подчеркнутые значения в табл. 3.16). Это происходит потому, что электрические углы между векторами ЭДС зубцовых гармоник и первой гармоники отличаются на величину, кратную 2π.

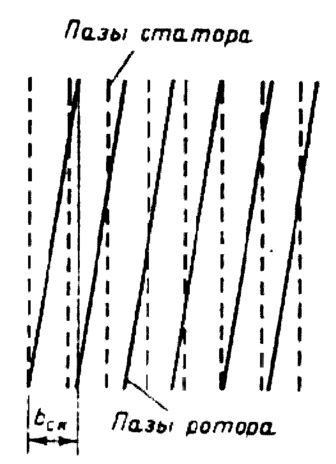


Рис. 3.15. К понятию скоса пазов

Порядок зубцовых гармоник увеличивается с увеличением числа q, при этом соответственно уменьшается их амплитуда, а следовательно, и отрицательное влияние на работу машины.

В малых машинах, в которых увеличение числа q затруднено, для подавления гармоник зубцового порядка выполняют скошенные пазы, т. е. пазы статора или ротора располагают не параллельно оси машины, а под некоторым углом к ней $\gamma_{ск}$, называемым углом скоса.

Скос пазов оценивают в линейных $b_{ск}$ или в относительных $\beta_{ск}$, размерах, показывающих, на сколько миллиметров или на какую часть зубцового деления по дуге окружности зазора изменено направление оси паза по сравнению с ее положением при нескошенных пазах (рис. 3.15).

Центральный угол, который определяется дугой, равной $b_{ск}$ называется углом скоса и оценивается в электрических радианах:

$$\gamma_{ск\nu} \quad b_{ск} \nu \pi / \tau \quad \nu \beta_{ск} 2p/Z, \tag{3.16}$$

где $b_{ск}$ измеряется в миллиметрах, а $\beta_{ск} = b_{ск}/ t_Z$ в относительных единицах по сравнению с зубцовым делением.

Скос пазов уменьшает ЭДС, наводимую в витках обмотки. Это влияние учитывается коэффициентом скоса:

$$k_{ск\nu} \quad \frac{2\sin\frac{\gamma_{ск\nu}}{2}}{\gamma_{ск\nu}} \tag{3.17}$$

Обычно скос пазов выполняют в пределах одного пазового деления ротора. В этом случае $k_{ск}$ для основной гармоники близок к единице, но он уменьшается при увеличении порядка гармонических. Поэтому машины небольшой мощности с малым числом q, в которых влияние высших гармоник особенно заметно, в большинстве случаев выполняют со скошенными пазами.

Следует отметить, что скос пазов приводит к снижению уровня шума при работе машины, поэтому двигатели в малошумном исполнении, как правило, выполняют со скошенными пазами [6].

3.7. СХЕМЫ ОДНОСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Для того чтобы лучше понять принцип соединений в однослойных обмотках, сделаем некоторые построения для одной из простейших трехфазных обмоток с числом пазов $Z = 24$, числом полюсов $2p = 4$, числом параллельных ветвей $a = 1$.

На рис. 3.16 показаны 24 линии пазов, разделенные на 4 группы, соответствующие полюсным делениям ($\tau = Z/2p = 24/4 = 6$ пазовых делений). На каждом полюсном делении отметим пазы, в которых должны лежать стороны катушек, принадлежащие разным фазам. На этом и всех последующих рисунках, изображающих схемы обмоток машин переменного тока, стороны катушек, принадлежащих разным фазам, изображены различными линиями: первой фазы — толстой, второй фазы — двойной, третьей фазы — тонкой. Так как обмотка симметрична, то на каждом полюсном делении размещают одинаковое число сторон катушек разных фаз, равное числу пазов на полюс и фазу:

$$q = Z/(2pm) = 24/(4 \cdot 3) = 2. \qquad (3.18)$$

Мгновенные направления токов, показанные стрелками на рис.3.16 в пределах одного полюсного деления (пазы 1—6), будут одинаковыми. В пазах соседних полюсных делений направление токов меняется на противоположное.

Рисунок 3.16 является как бы схемой активной (пазовой) части рассматриваемой обмотки. Лобовые соединения катушек должны быть выполнены так, чтобы направление токов в пазовых частях соответствовало показанному на рисунке. Их можно выполнить в нескольких вариантах, получив при этом тот или иной тип однослойной обмотки.

Рассмотрим схемы наиболее распространенных однослойных обмоток: обмоток с концентрическими катушками (концентрические обмотки) и равнокатушечных.

Однослойные концентрические обмотки. Схема одной из концентрических обмоток изображена на рис. 3.17, на котором сохранены принятые на рис. 3.16 нумерация пазов и условные обозначения катушек разных фаз различными линиями.

Однослойные концентрические обмотки характерны тем, что катушки, образующие каждую катушечную группу, охватывают одна другую. Катушки имеют различные шаги по пазам, поэтому их размеры различны. Наружные катушки в группе имеют большую ширину и длину, чем внутренние. Чтобы уменьшить их размеры, у половины катушек каждой катушечной группы изменяют Направление отгиба лобовых частей, что приводит к уменьшению шага и некоторому уменьшению ширины и длины наружных катушек в группе. При этом катушечные группы получаются как бы «разваленные»: у половины катушек в



Рис. 3.16. К построению схем однослойных обмоток

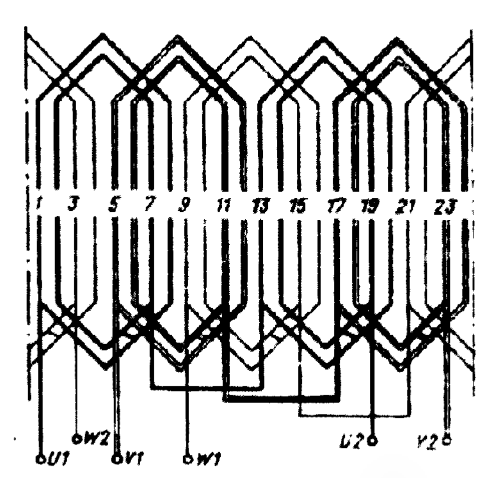


Рис. 3.17. Схема однослойной концентрической обмотки, $Z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$, $a = 2$

в группе лобовые части отогнуты в одном направлении, а у второй половины — в другую. Такая обмотка получила название обмотки вразвалку (рис. 3.18).

В концентрической обмотке, выполненной вразвалку, в 2 раза уменьшается число катушек в каждой группе, но вдвое увеличивается число катушечных групп. Лобовые части катушек такой обмотки расположены по торцам статора более равномерно и компактно.

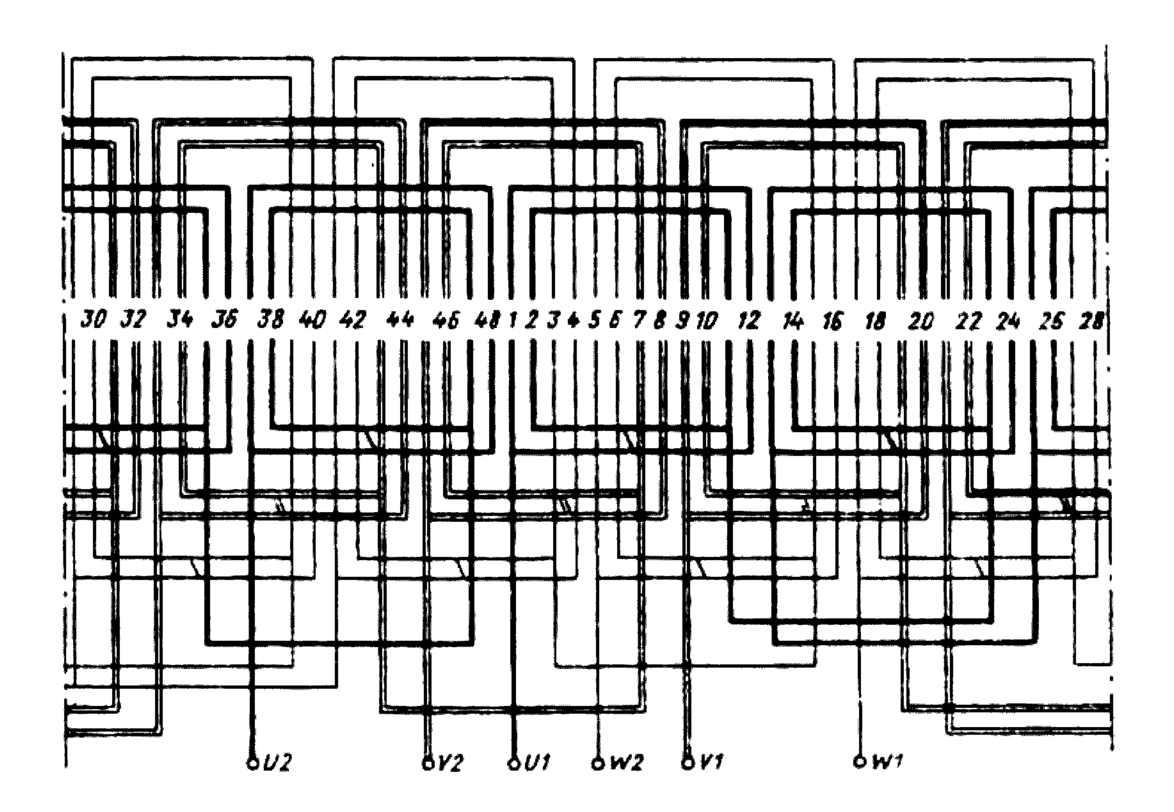


Рис. 3.18. Схема однослойной концентрической обмотки вразвалку, $Z = 48$, $2p = 4$, $q = 4$, $a = 1$

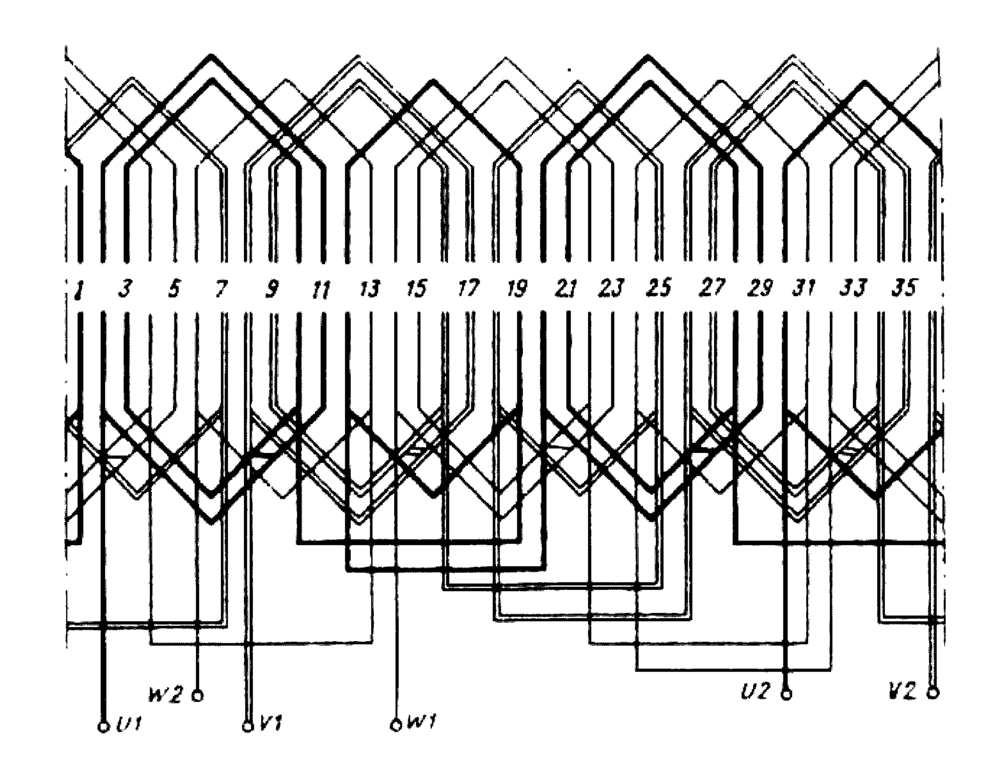


Рис. 3.19. Схема однослойной концентрической обмотки вразвалку,
$Z = 36$, $2p = 4$, $q = 4$, $a = 1$

Обмотку вразвалку применяют в большинстве машин с четным числом на полюс и фазу. При четном q обмотку также можно выполнить вразвалку,, но для этого приходится каждую катушечную группу подразделять на две полугруппы с разным числом катушек, лобовые части которых отогнуты в противоположные стороны. Например, при $q = 3$ лобовые части двух катушек в группе должны быть отогнуты в одном направлении и одной — в противоположном (рис. 3.19). Равномерность расположения лобовых частей несколько нарушается. Кроме того, возрастает сложность намотки и укладки обмотки. Поэтому концентрическую обмотку вразвалку при нечетном q применяют редко.

Иногда обмотку с нечетным числом q выполняют вразвалку с так называемой «расчесанной» катушкой: витки наибольшей катушки в группе разделяют в лобовых частях пополам и отгибают в разные стороны. Длина вылета лобовых частей и шаг катушек уменьшаются, но технология укладки таких обмоток усложняется и встречаются они редко.

В современном электромашиностроении однослойные концентрические обмотки применяют только в машинах малой мощности. Их лобовые части после укладки в пазы собирают в сплошной жгут и бандажируют, однако названия обмоток — двухплоскостная и трехплоскостная — в технической литературе сохранились, так же как и способ изображения на схемах лобовых частей катушек соседних групп с разной длиной прямолинейных частей, т. е. в разных плоскостях (см. рис. 3.18).

Равнокатушечные обмотки. Необходимое направление токов в пазах машины (см. рис. 3.16) может быть получено и при других вариантах соединения пазовых частей катушек лобовыми, например, в обмотке из катушек одинаковых размеров и конфигурации (рис. 3.20). Такие обмотки называют равнокатушечными. Из сравнения схем, изображенных на рис. 3.17 и 3.20, видно, что обмотки отличаются друг от друга только формой лобовых частей катушек. Нормирование катушечных групп и последовательность их соединения остаются такими же, как и в обмотке с концентрическими катушкам, как и в концентрической обмотке. Равнокатушечные обмотки в технической литературе часто называют шаблонными, а выполненные вразвалку — цепными.

На рис. 3.17—3.21 показаны однослойные обмотки четырехполюсные машин с полюсным делением $\tau = Z/(2p)$ 24/ 4 = 6 зубцовых делений. Катушки концентрической обмотки выполнены с шагами, равными 5 (меньшая) и 7 (большая) зубцовым делениям; равнокатушечная обмотка вразвалку (см. рис. 3.21) выполнена с шагом по пазам, равным y 5. Таким образом, в них нет катушек с диаметральным шагом, т. е. с шагом, равным полюсному делению $y = \tau = 6$. В то же время, построив векторную диаграмму (звезду пазовых ЭДС), можно убедиться, что обмоточные коэффициенты обмоток численно равны коэффициенту распределения, определенному по (3.13). Это является особенностью всех

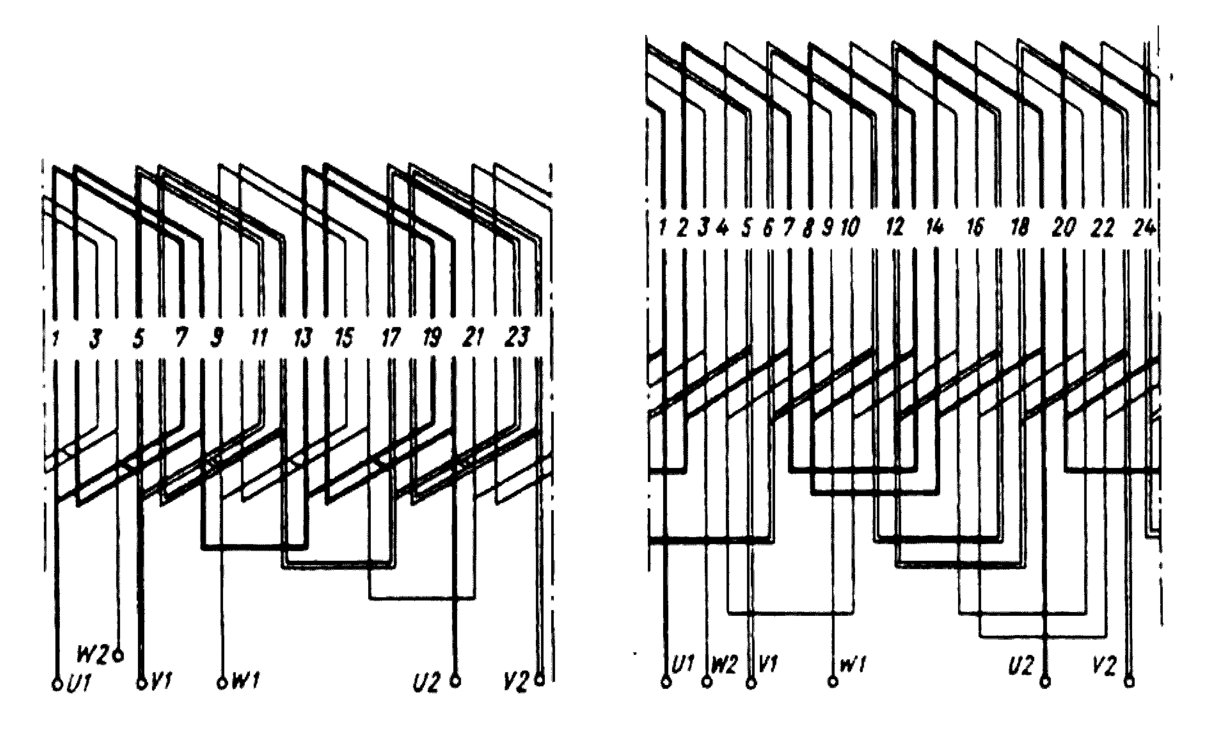


Рис. 3.20. Схема однослойной равнокатушечной обмотки, $Z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$, $a = 1$

Рис. 3.21. Схема однослойной ранокатушечной обмотки вразвалку, $Z = 24$, $2p = 4$, $q = 2$, $a = 1$

однослойных обмоток со сплошной фазной зоной. Поэтому при расчете обмоточного коэффициента таких обмоток принимают $k_у = 1$ независимо от шагов катушек (см. § 3.6).

Таким образом, в однослойных обмотках на амплитуду высших гармоник влияет только равномерность распределения катушек по пазам (число q), а не шаг самих катушек, что снижает возможность подавления высших гармоник в поле машины. Из-за этого, а в первую очередь, из-за невозможности существенно уменьшить амплитуды 5-й и 7-й гармоник, однослойные обмотки применяют только в машинах малой мощности.

С несплошной фазной зоной могут быть выполнены, например, цепные обмотки. Для этого в каждой фазной зоне располагают стороны катушек не одной, а двух фаз. Коэффициент укорочения таких однослойных обмоток отличен от единицы, однако их выполнение встречает определенные технологические трудности, а при нечетном числе q приводит к несимметрии МДС магнитного поля машины. Поэтому их применение ограничено. В связи с распространением станков для механизированной укладки обмотки, область применения однослойных концентрических обмоток несколько расширилась. Большинство современных обмоточных станков, работающих по принципу втягивания катушек, рассчитано на укладку однослойных концентрических обмоток.

3.8. СХЕМЫ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Двухслойные обмотки применяют, практически, во всех машинах переменного тока, начиная с машин мощностью 15...16 кВт и кончая крупными турбо- и гидрогенераторами. Основным достоинством двухслойных обмоток является возможность использования укорочения шага для подавления высших гармоник в кривой ЭДС. Кроме того, двухслойные обмотки имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с однослойными, например по количеству возможных вариантов выполнения параллельных ветвей, дробного числа пазов на полюс и фазу, равномерности расположения лобовых частей катушек и др.

Составим схему обмотки статора трехфазной машины с $Z = 24$, $2p = 4$, a 1. На рис. 3.22. а изображены 24 пары линий (сплошные и пунктирные) лежащих в пазах, и разделенные на четыре полюсных деления. На полюсном делении на каждую фазу приходится по два паза, так как $q = 2$. Стрелками на сплошных линиях, соответствующих верхним сторонам катушек, показано мгновенное направление токов в катушках, одинаковое во всех фазах в пределах одного полюсного деления и изменяющееся на обратное при переходе к следующему, т. е.

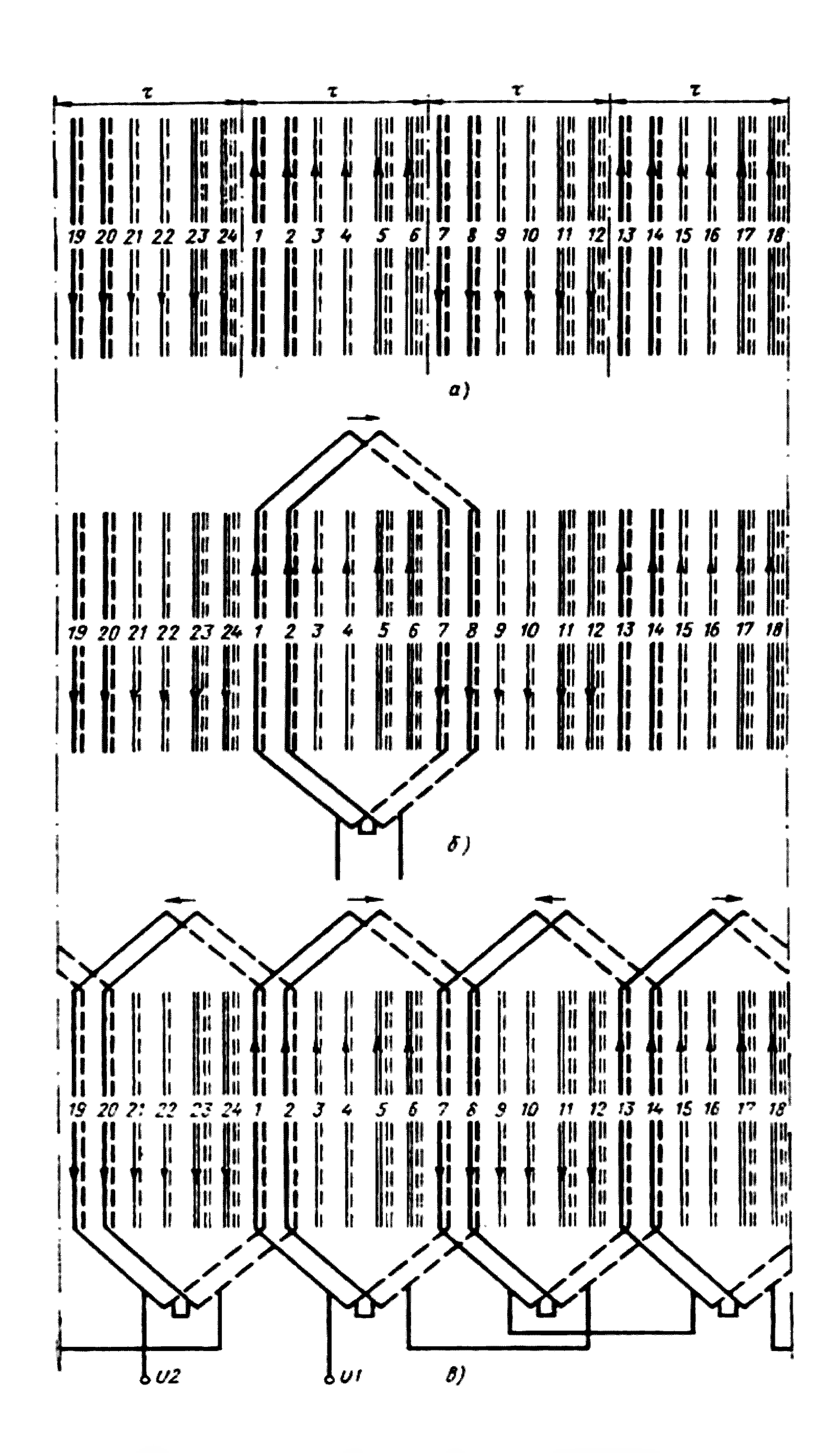


Рис. 3.22. К построению схем двухслойных обмоток:
а – распределение пазов по полюсным делениям; *б* – образование катушечной группы;
в – соединение катушечных групп одной фазы обмотки

проделаны те же построения, что и в примере на рис. 3.16. Стрелки на пунктирных линиях, соответствующих сторонам катушек, лежащих в нижнем слое паза, не показаны. Направления токов в них зависят от шага обмотки.

Для наиболее простого случая при диаметральном шаге y τ лобовые части соединяют стороны катушек, лежащие на расстоянии полюсного деления друг от друга. Это соединение показано на рис. 3.22, б для катушек, верхние стороны которых расположены в соседних пазах на полюсном делении и занимают одну фазную зону. В рассматриваемом примере таких катушек две, так как $q = 2$. Соединенные последовательно, они образуют одну катушечную группу фазы обмотки.

Всего катушечных групп в одной фазе двухслойной обмотки столько же, сколько полюсов. На рис. 3.22. в все катушки одной фазы соединены в катушечные группы, а группы — между собой. Для того чтобы направления мгновенных значений токов, отмеченные стрелками, сохранились, катушечные группы соединяют между собой встречно, т. е. конец первой группы с концом второй, начало второй с началом третьей и т. д. При этом направление обтекания током катушечных групп (показано стрелками над катушечными группами) при переходе от одного полюсного деления к другому меняется на обратное. Обмотки остальных фаз строят аналогично.

Особенность такой схемы — число катушечных групп в фазе равно числу полюсов при встречном включении следующих друг за другом в фазе катушечных групп — является закономерностью для всех двухслойных обмоток с 60-градусной фазной зоной.

На рис. 3.23 приведена полная схема обмотки с диаметральным шагом, $Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$. Начала фаз $V1$ и $W1$ взяты последовательно через $2q$ пазовых делений по отношению к началу первой фазы — $U1$, т. е. через число пазов, соответствующих электрическому углу 120°.

Любое укорочение шага или изменение числа q не меняет принципа построения схемы. При укороченном шаге меняется только ширина катушек (рис. 3.24). Все соединения, как междукатушечные, так и межгрупповые, остаются такими же. Сравнивая между собой схемы обмоток с диаметральным и укороченным шагами, следует отметить, что в первом случае в каждом из пазов размещены стороны катушек, принадлежащих одной и той же фазе. При укорочении шага в части пазов размещают стороны катушек, принадлежащих разным фазам, например в пазах 2, 4, 6, 8 и др. (см. рис 3.24). Относительное количество таких пазов по сравнению с пазами, занятыми сторонами катушек только одной фазы, зависит от принятого укорочения шага. С уменьшением оно возрастает. Это является особенностью обмоток с укороченным шагом.

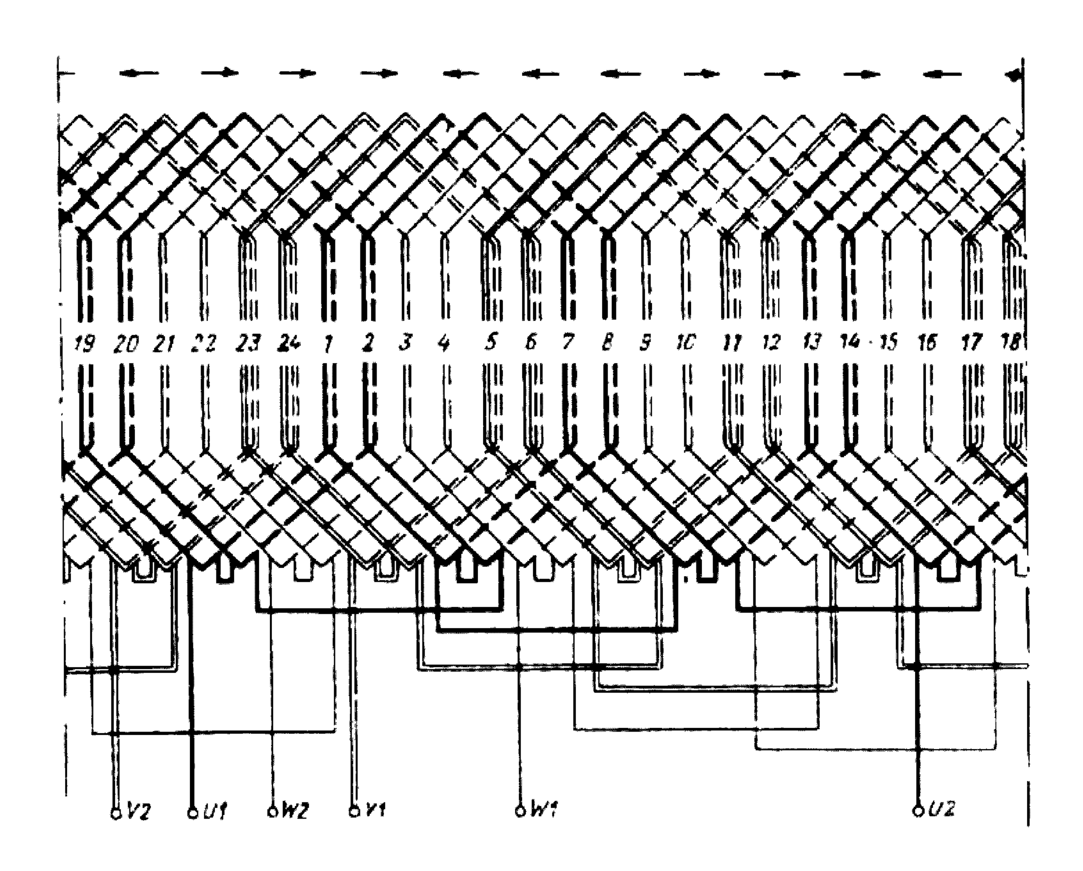


Рис. 3.23. Схема двухслойной обмотки с диаметральным шагом, $Z = 24$, $2p = 4$, $y = \tau = 6$, $a = 1$

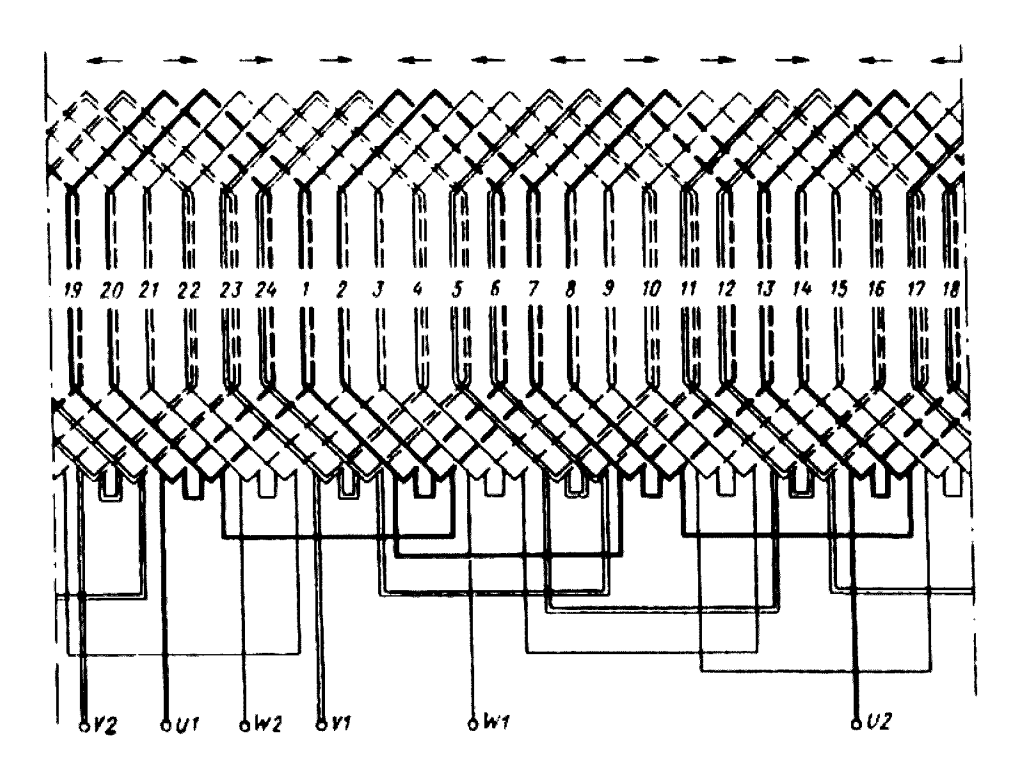


Рис. 3.23. Схема двухслойной обмотки с укороченным шагом, $Z = 24$, $2p = 4$, $y = 5/6\ \tau = 5$, $a = 1$

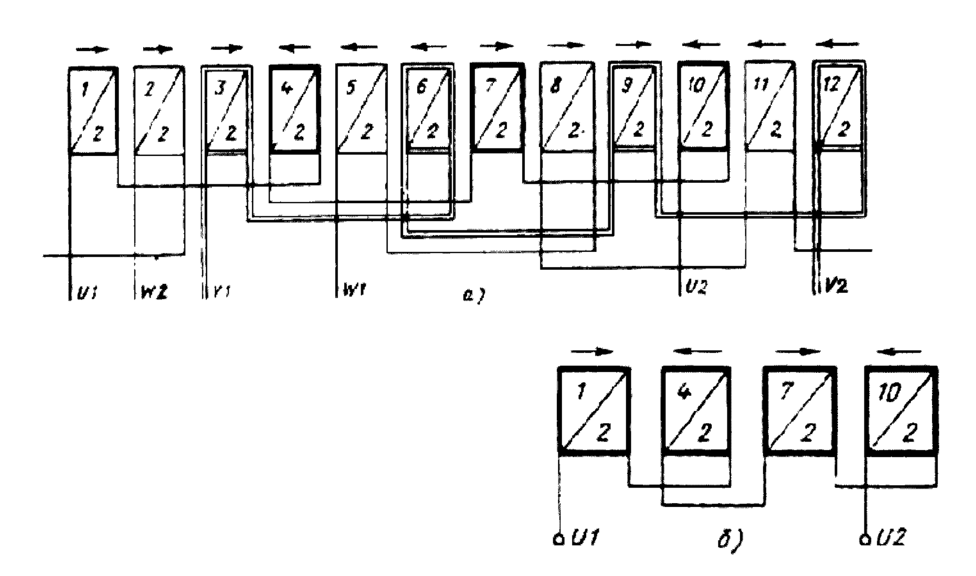


Рис. 3.25. Условная схема двухслойной обмотки ,
$Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$
а – схема соединений трех фаз, *б* – схема соединений одной фазы

Анализ схем двухслойных обмоток удобнее проводить с помощью так называемых условных схем, которые используют в технической литературе наряду с развернутыми и торцевыми. В таких схемах, в отличие от развернутых, используют условные обозначения не отдельных катушек, а целиком катушечных групп обмотки. Это является логическим продолжением принятого в развернутой схеме упрощенного изображения катушки одним контуром независимо от действительного числа витков в ней, так как все катушки в катушечной группе соединяют между собой только последовательно.

Рис. 3.25, *а* является условной схемой обмоток, развернутые схемы которых изображены на рис. 3.23 и 3.24. В каждом прямоугольнике, обозначающем катушечную группу, выше диагонали проставлен порядковый номер катушечной группы (начиная с 1-й группы первой фазы) в последовательности расположения их по пазам статора. Ниже диагонали указано количество катушек в данной катушечной группе. Последняя запись введена, чтобы иметь возможность использовать условные схемы для обмоток с дробными числами пазов на полюс и фазу. На полях условной схемы конкретной обмотки должно быть указание о шаге обмотки, так как и при диаметральном, и при укороченном шагах условная схема одна и та же. Для облегчения анализа схемы отметим стрелками над прямоугольниками, изображающими катушечные группы, направления обхода их витков током.

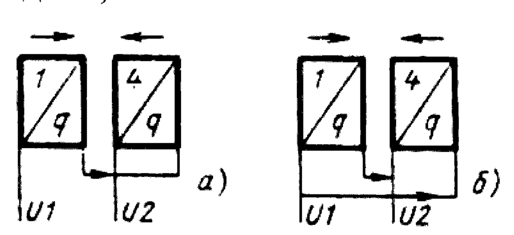


Рис. 3.26. Условные схемы соединений фазы
обмотки с $2p = 2$ при различных числах параллельных ветвей:
а – при $a = 1$; *б* – при $a = 2$

Из рис. 3.25, *а* видно, что соединения катушечных групп каждой фазы обмотки

полностью идентичны, поэтому то же количество информации может быть представлено более компактно, т. е. изображением схемы только одной фазы обмотки при соответствующих надписях на чертеже (рис. 3.25, б).

Такие схемы ясно показывают специфику межгрупповых соединений в обмотке, Практически формирующих нужную полюсность при заданном числе параллельных ветвей, и позволяют рассматривать не отдельные схемы обмоток машин с различными числами Z и *q*, а представлять их в виде типовых схем для любых Z при определенном числе полюсов.

Рассмотрим некоторые схемы двухслойных обмоток с различным числом параллельных ветвей.

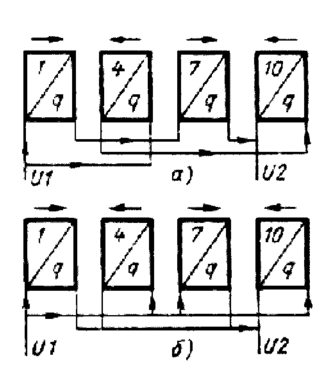


Рис. 3.27 Условные схемы соединений фазы обмотки с $2p = 4$ в несколько параллельных ветвей: а – при $a = 2$, б – при $a = 4$

На рис. 3.26, *а* приведена условная схема обмотки двухполюсной машины (одной ее фазы), определяющая ее соединение при a = 1. При изменении числа параллельных ветвей
ванных катушечными группами, не должна меняться, поэтому не должны менять своего направления и стрелка над прямоугольниками на схеме обмотки.

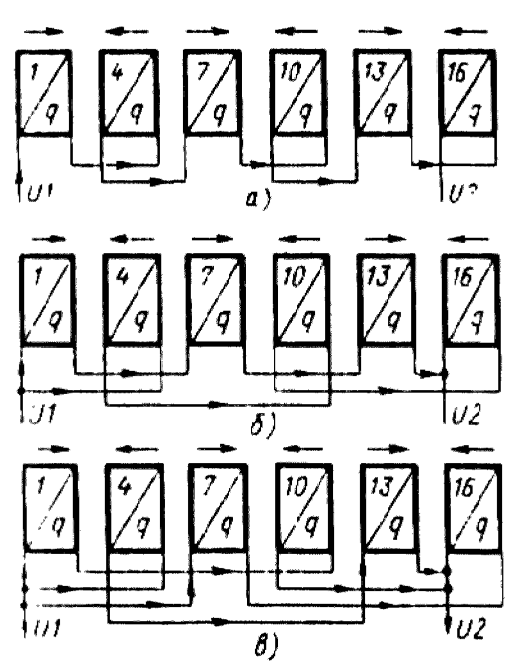


Рис. 3.28. Условные схемы соединений фазы обмотки с 2р=6 с несколькими параллельными ветвями: а – при $a = 1$, б – при $a = 2$, в – при $a = 3$

Обмотку двухполюсных машин можно выполнить и при a = 2. Условная схема такой обмотки (2р = 2, a = 2) показана на рис. 3.26. б. Как видно, межгрупповые соединения изменены таким образом, что катушечные группы образуют две параллельные ветви, но полярность полюсов остается прежней.

На рис. 3.25, б показана схема обмотки при 2р = 4, a = 1, а на рис. 3.27, в приведена схема обмотки с тем же числом полюсов, но при a = 2. Полярность катушечных групп в обеих схемах одна и та же. На рис. 3.27,б дана схема той же обмотки, но при a = 4. Условия сохранения полярности катушечных групп соблюдены и при четырех параллельных ветвях.

Аналогичные варианты схем обмоток при нескольких параллельных ветвях для обмотки шестиполюсной машины приведены на рис. 3.28. Для a = 2 и a – 3 возможны иные, чем приведенные на рисунке, варианты соединений, при которых полярность катушечных групп остается правильной.

Принцип построения схем обмоток с большими числами пар полюсов и другими возможными числами параллельных ветвей остается таким же [6].

3.9. ОБМОТКА С ДРОБНЫМ ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Анализ выражения (3.15), определяющего коэффициент распределения, показывает, что амплитуда высших гармонических в кривой ЭДС обмотки зависит от угла между векторами ЭДС отдельных катушек. В обмотке с целым q этот угол всегда равен пазовому углу az $2p\pi / Z = \pi/(mq)$, поэтому для уменьшения k_p высших гармоник необходимо увеличивать число q. Но с увеличением q растет число пазов и соответственно уменьшаются зубцовые деления, ширина зубцов и пазов. Это ограничивает наибольшие допустимые значения q, так как в узких пазах ухудшается заполнение паза медью и истого, ширина зубцов не может быть взята меньше предельной, определяемой их допустимой механической прочностью.

Как видно из табл. 3.16, заметное уменьшение k_p большинства высших гармоник происходит уже при q 3, однако при этом, как показано в § 3.6, k_p для гармоник зубцовых порядков остается таким же, как и для основной гармоники. Чтобы повысить порядок зубцовых гармоник и тем самым уменьшить их амплитуду и влияние на характеристики машины, стремятся увеличить число пазов на полюс и фазу до 4—5 и более. Это легко достижимо в машинах с $2p$ = 2 или 4. Для машин с $2p$ – 6 или 8 при сравнительно небольших диаметрах статора выполнение q = 4—5 затруднено, а в машинах с большим числом полюсов, особенно в тихоходных с 2р = 30—40 и более , вообще невозможно, так как даже при q = 4 в таких машинах необходимо выполнить более 300—400 пазов.

В этих случаях для улучшения кривой поля в воздушном зазоре применяют обмотку, в которой число катушек в катушечных группах не одинаково, а периодически меняется. При этом относительное положение векторов ЭДС катушек различных катушечных групп фазы изменяется по сравнению с обмоткой, в которой число катушек во всех группах постоянно, и угол между векторами ЭДС катушек после соединения схемы становится меньше a_z. Среднее число q при этом получается дробным, и обмотки называют «обмотками с дробным q». Для того чтобы оценить преимущества применения обмоток с дробным, проведем сравнение процессов формирования поля в машинах с целыми и дробными числами пазов на полюс и фазу.

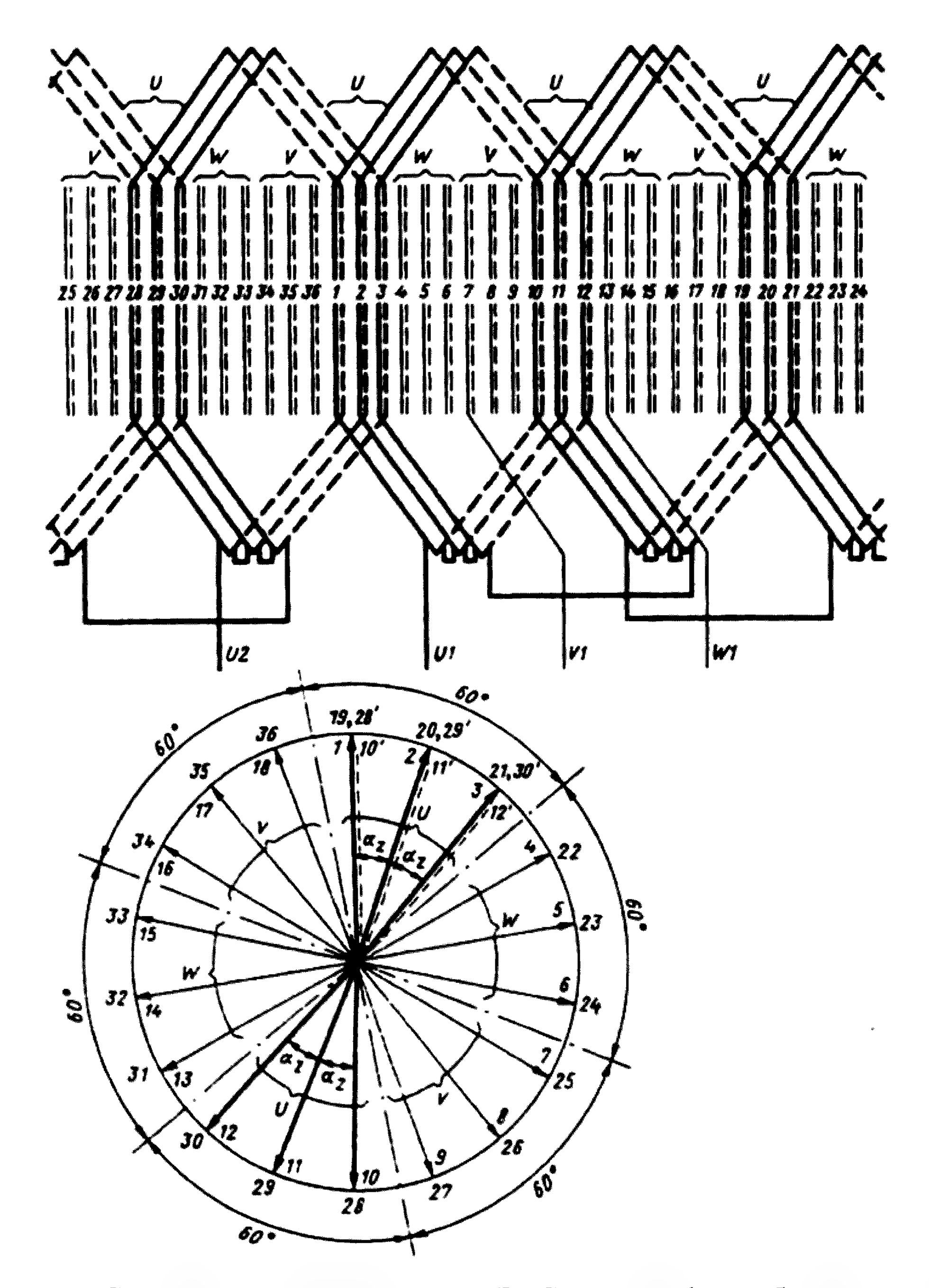


Рис. 3.29. Схема и векторная диаграмма ЭДС катушек фазы обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу, $Z = 36$, $2p = 4$, $a = 1$, $q = 3$

На рис. 3.29 приведены схема-развертка первой фазы четырехполюсной обмотки с $q = 3$ и векторная диаграмма ЭДС катушек этой фазы. На окружности цифрами без штрихов обозначены номера пазов статора. Внутренний ряд цифр соответствует пазам, в которых лежат стороны катушек, образующие первую пару полюсов (двойное полюсное деление занимает электрический угол 360°), наружный ряд цифр — пазам второй пары полюсов.

Условимся, что вектор ЭДС первой от начала отсчета катушки направлен от центра диаграммы к отметке на окружности, соответствующей первому пазу, и присвоим этой катушке номер 1. Тогда векторы ЭДС всех последующих катушек обмотки будут направлены на отметки, соответствующие следующим номерам пазов согласно принятому порядку отсчета — по часовой стрелке.

В рассматриваемой схеме $a_z = 180°/(mq) = 180°/(3\cdot3) = 20°$. Согласно схеме обмотки три первые катушки ($q = 3$) образуют первую катушечную группу фазы U, и векторами их ЭДС будут векторы 1, 2 и 3. Далее по обходу окружности векторной диаграммы следуют векторы ЭДС катушек второй и третьей катушечных групп, принадлежащих фазе W, — векторы 4, 5, 6, и фазе V — векторы 7, 8 и 9. Векторы 10, 11и 12 являются векторами ЭДС катушек четвертой катушечной группы, принадлежащей фазе U, а следующие за ними (13—18) — векторами пятой и шестой катушечных групп (фазы W и V). На этом обход первых двух полюсных делений заканчивается. При обходе следующего двойного полюсного деления картина полностью повторяется.

Первая и четвертая катушечные группы, принадлежащие фазе U, в схемах двухслойных обмоток с 60-градусной фазной зоной всегда включены встречно. Поэтому векторы катушек четвертой катушечной группы (10, 11 и 12) на векторной диаграмме должны быть повернуты на 180°. Повернутое положение этих векторов показано на диаграмме пунктиром, а их номера обозначены прежними цифрами, но со штрихами (10', 11', 12'). Повернутые векторы полностью совпадают со сходными векторами ЭДС катушек первой катушечной группы. При обходе следующего двойного полюсного деления такое положение сохраняется. В общем случае совпадение векторов ЭДС сходных катушек, включенных встречно, катушечных групп одной фазы сохраняется при любом целом числе q, так как сходные катушки двух соседних групп фазы всегда располагают по окружности зазора на расстоянии $3q$ пазовых делений, образующих центральный угол $a = 3q = 180°$.

Таким образом, в обмотках с целым q угол между векторами ЭДС катушек фазы после соединения обмотки определяется количеством катушек в катушечной группе, которое для всей обмотки постоянно и равно q. Следовательно, коэффициент распределения таких обмоток зависит только от числа q.

Следует также отметить, что в обмотках с целым q угол между векторами ЭДС катушек может быть определен на векторной диаграмме по положению векторов ЭДС первой катушечной группы, т. е. процесс формирования обмотки заканчивается после обхода одного полюсного деления по окружности зазора. При дальнейшем обходе векторы ЭДС всех остальных катушек фазы после соединения схемы совпадают со сходными векторами ЭДС катушек первой катушечной группы.

Обмотки с дробным q состоят из катушечных групп с разным числом катушек, поэтому сходные катушки двух соседних групп фазы располагают по окружности зазора на расстоянии, отличном от $3q$, т. е. не так, как в обмотках с целым q. Следовательно, центральный электрический угол между ними не будет равен 180°, и при встречном включении катушечных групп (при повороте векторов ЭДС катушек на 180° на векторной диаграмме) совпадения векторов ЭДС сходных катушек не произойдет.

Рассмотрим схему одной из простейших обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу [Z = 30, 2p = 4, m = 3, $q = Z/(2pm)$ — $30/(4\cdot 3) = 2\frac{1}{2}$], развернутая схема одной фазы которой и векторная диаграмма ЭДС катушек этой фазы приведены на рис. 3.30.

Для расчета и анализа схем обмоток дробное число q обычно выражается неправильной дробью:

$$q \quad b + \frac{c}{d} = \frac{N}{d} \tag{3.19}$$

где b — целая часть дробного q, с — числитель дробной части q; d знаменатель дробной части q, называемый часто знаменателем дробности обмоток; N — числитель неправильной дроби, выражающей число q, причем $N = bd + c$.

Применяя эти обозначения для обмотки с $q = 2\frac{1}{2}$, можем записать $b = 2$; с = 1; $d = 2$; $N = 2 \times 2 + 1 = 5$.

Обратим внимание на некоторые закономерности схемы, характерные для всех обмоток с дробным q. Катушечные группы не могут состоять из дробного числа катушек, поэтому числа катушек в группах подбирают таким образом, чтобы дробному q соответствовало среднее число катушек в катушечных группах. Для этого катушечные группы в обмотках с дробным q выполняют большими и малыми. В больших катушечных группах на одну катушку больше, чем в малых. Большие и малые катушечные группы чередуются между собой с определенной периодичностью.

Рассматриваемая обмотка состоит из равного числа больших и малых катушечных групп, содержащих соответственно по три и по две катушки каждая (в среднем по $2\frac{1}{2}$ катушки в группе). Число катушек в малых катушечных группах всегда равно b, а в больших $b + 1$. Чередование больших и малых групп вдоль зазора записывается рядом цифр, определяющих количество катушек в последовательно расположенных катушечных группах. Для рассматриваемого примера таким рядом будет |32|22|32... Из этой записи следует, что первой от начала отсчета будет большая катушечная группа, состоящая из трех катушек, затем малая,

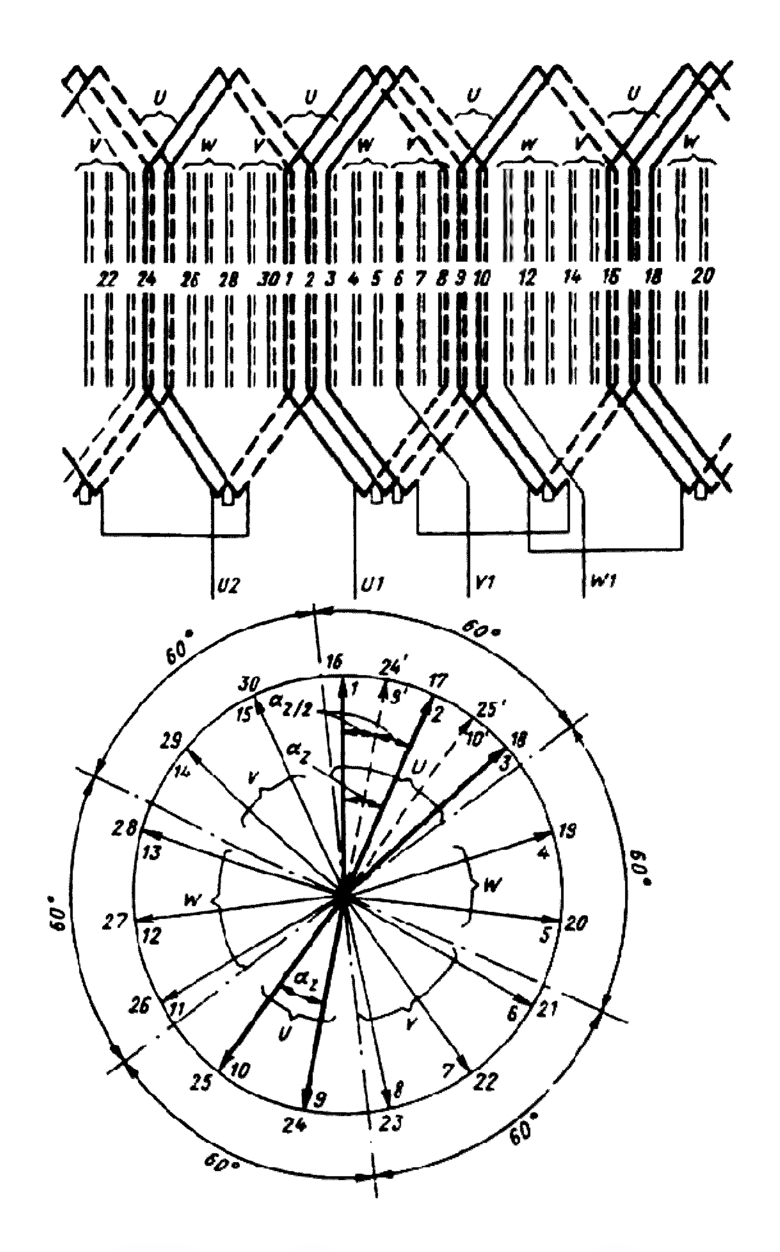


Рис. 3.30. Схема и векторная диаграмма ЭДС катушек фазы обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, $Z = 30$, $2p = 4$, $a = 1$, $q = 2\frac{1}{2}$

состоящая из двух катушек, затем опять большая и т. д. Чередование имеет строго определенную для каждой обмотки периодичность. В данной обмотке в каждом периоде (периоды разделены вертикальными линиями) имеются по две катушечные группы и по $2 + 3 = 5$ катушек. В общем случае в дробных обмотках в каждом периоде чередования содержится по d катушечных групп и по N катушек. При этом условии среднее число катушек в группе за один период будет равно q, так как $N/d = q$.

На рис. 3.30, так же как и в разобранном ранее примере (см. рис. 3.29), толстыми линиями показаны векторы ЭДС фазы. В первой катушечной группе фазы содержатся три катушки (векторы 1, 2, 3). Далее по обходу окружности диаграммы следуют векторы ЭДС катушек второй катушечной

группы, принадлежащие фазе W, их два (4 и 5). В третьей катушечной группе (фаза V) три катушки. Векторы их ЭДС на диаграмме 6, 7 и 8. Четвертая катушечная группа принадлежит фазе U и содержит две катушки, векторы их ЭДС 9 и 10. Далее по обходу следуют большая катушечная группа фазы W с тремя катушками (векторы 11, 12. 13) и малая фазы V (векторы 14 и 15). На этом обход двойного полюсного деления заканчивается.

При соединении схемы, как всегда в двухслойных обмотках, следующие друг за другом в фазе катушечные группы включают встречно. Для фазы V это первая и четвертая катушечные группы. Повернув на диаграмме векторы ЭДС четвертой катушечной группы на 180° (новые положения векторов показаны пунктиром, а их номера обозначены 9' и 10'), убеждаемся, что в обмотке с дробным q их новое направление не совпадает с направлением векторов ЭДС катушек первой группы, как это было в обмотках с целым q. В данной обмотке при $q = 2\frac{1}{2}$ они занимают среднее положение, деля угол между векторами ЭДС катушек первой группы пополам. Действительно, между катушками 1 и 9 заключено восемь зубцовых делений, соответствующих центральному углу $8a_z = 8 \times 24 = 192°$, и после поворота вектора 9 на 180° образуется электрический угол 192 - 180 = 12°, равный $a_z/2$. Таким образом, после соединения схемы векторы ЭДС катушек одной фазы в обмотке с $q = 2\frac{1}{2}$ располагаются со сдвигом между собой на электрический угол $a_z/2$.

Если в обмотке знаменатель дробности числа q будет больше 2, например, 4 или 5 и т. д., то электрический угол между сходными векторами последовательных катушечных групп фаз после соединения обмотки будет уменьшаться. В общем случае этот угол составляет

$$dz/d = \pi/(mqd) = \pi/(mN).$$

Поэтому выражение для коэффициента распределения обмоток с дробным q записывается следующим образом:

$$k_p = \frac{\sin(\frac{\pi}{2m}\nu)}{N\sin(\frac{\pi}{2mN}\nu)} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2m}\nu)}{qd\sin(\frac{\pi}{2mqd}\nu)}, \qquad (3.20)$$

где $N = bd + c = qd$ — числитель неправильной дроби, определяющей число q.

Следовательно, применив обмотку с дробным q, можно получить такое же значение k_p, т. е. такие же результаты, с точки зрения подавления высших гармонических, как и при увеличении числа пазов в машине. Это достоинство обмоток с дробным q привело к их широкому

распространению в крупных тихоходных машинах переменного тока.

Следует отметить, что формула (3.20) является общей для расчета коэффициента k_p обмоток с целыми и дробными числами q, так как при целых q [см. (3.15)] знаменатель дробности обмоток $d = 1$ и $c = 0$.

Выбор знаменателя дробности d, от которого в основном зависит угол между ЭДС катушек фазы, определяется условиями симметрии обмотки и необходимым числом параллельных ветвей. Обмотка будет симметричной, если общее число катушечных групп фазы, равное 2p, содержит целое число периодов чередования больших и малых катушечных групп. В каждом периоде содержится d катушечных групп, следовательно, условием симметрии будет кратность числа катушечных групп в фазе (2p) числу катушечных групп в периоде (d), т. е. $2p/d$ равно целому числу, при этом число катушек в фазе двухслойной обмотки, равное Z/ m, будет кратно числу катушек в периоде N, так как

$$\frac{2p}{d} = \frac{2pmq}{dmq} = \frac{Z}{mn}$$

равно целому числу.

Параллельные ветви в обмотке с дробным q могут быть образованы только из катушечных групп, составляющих целое число периодов чередования, так как ЭДС отдельных катушечных групп сдвинуты между собой по фазе, а ЭДС больших и малых катушечных групп не равны по амплитуде. При этом условии допустимое число параллельных ветвей

$$a = 2p/(dk), \tag{3.21}$$

где k – любое целое число.

Максимально возможное число параллельных ветвей

$$a = 2p/d. \tag{3.22}$$

При составлении схем обмоток, в которых числитель дробной части числа q равен $c = 1$ или $c = d - 1$, последовательность чередования больших и малых катушечных групп безразлична. Например, для обмоток с $q = 2\frac{1}{2}$ может быть принято чередование |2223|2223| или |2232|2232| или любое другое, образованное перестановкой этих же цифр. Эти чередования отличаются друг от друга только выбором начальной катушки первой фазы и полностью равноценны.

В других случаях, когда $1 < c < (d - 1)$, например, в обмотках с $q = 2\frac{4}{7}$ или $q = 4\frac{3}{5}$ и т. д., наиболее благоприятное с точки зрения симметрии обмотки чередование катушечных групп находят различными способами. Наиболее удобный из них заключается в следующем.

По значениям $q = b + (c/d)$ составляют таблицу, имеющую с строк и d столбцов (рис. 3.31). В клетки таблицы вписывают числа катушек в катушечных группах. Заполнение таблицы начинают с верхней новой клетки в последовательности, показанной на рис. 3.31 стрелками. Сначала в клетки вписывают числа катушек, содержащихся в больших катушечных группах. Этими цифрами заполняют столько клеток, сколько в периоде держится больших катушечных групп, т. е. с клеток — весь первый столбец.

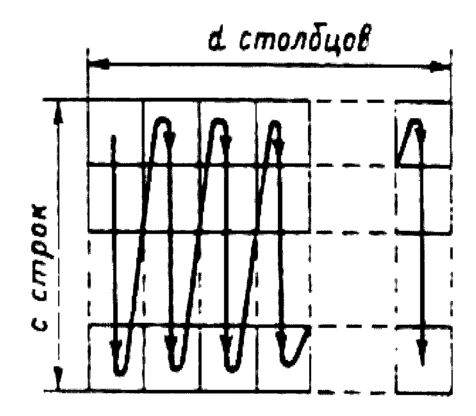


Рис. 3.31. К составлению таблиц чередования катушечных групп в обмотке с дробным q

Продолжая заполнение таблицы в указанном порядке, вписывают в следующие клетки числа катушек, содержащихся в малых катушечных группах, столько раз, сколько их есть в периоде чередования, т. е. d - с. Далее опять вписывают числа катушек в больших катушечных группах, потом в малых и т. д. Вписывание продолжают в той же последовательности, пока все клетки таблицы не будут заполнены. Нужное чередование катушечных групп в периоде читают по строкам заполненной таблицы.

Для пояснения этого метода приведем пример определения возможных чередований больших и малых групп для обмотки с $q = 4\frac{3}{5}$. В этой обмотке $b = 4$, с = 3, $d = 5$.

Составим таблицу, имеющую с = 3 строки и $d = 5$ столбцов. Каждый период чередования катушечных групп обмотки будет содержать с = 3 большие катушечные группы, состоящие из $b + 1 = 4 + 1 = 5$ катушек, и d – с = 5 – 3 = 2 малые группы, состоящие из $b = 4$ катушек каждая. Вписываем в клетки первого столбца, начиная с верхней, три (по числу больших катушечных групп) цифры 5 — число катушек в больших катушечных группах, заполняя весь первый столбец. Далее, начиная с верхней клетки второго столбца, вписываем в две клетки (по числу малых катушечных групп в периоде) цифры 4 — число катушек в малых группах. Далее продолжаем запись, заполняя клетки таблицы в указанной последовательности:

5	4	5	4	5
5	4	5	5	4
5	5	4	5	4

По строкам таблицы читаем нужное чередование больших и малых катушечных групп. Все три строки таблицы показывают одно и то же чередование, изменяется только начало отсчета первой катушечной группы, следовательно, для построения обмотки можно взять любое из трех,

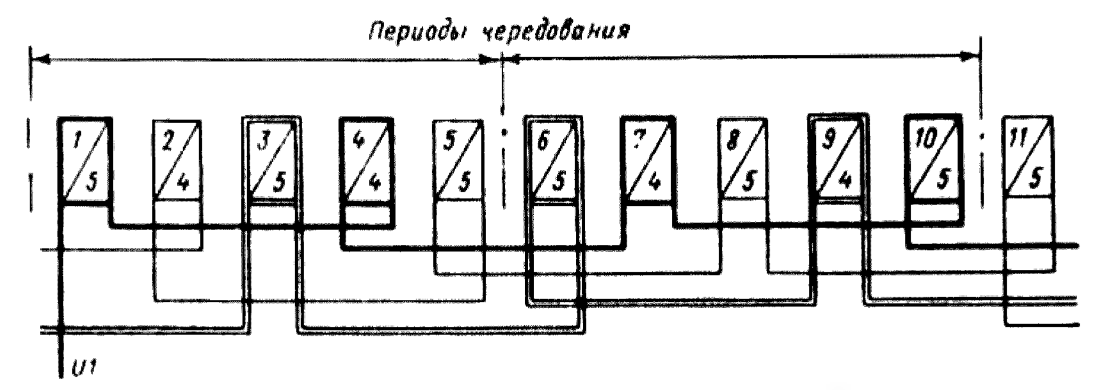


Рис. 3.32. Элемент условной схемы обмотки с $q = 4\,{}^{3}\!/_{5}$

например первую строку |54545|54545|... или вторую строку |54554|54554|...

Условные схемы обмоток с дробным q такие же, как и для обмоток с целым q. Меняя только числа, обозначающие количество катушек в катушечных группах, проставляемые под диагоналями в прямоугольниках. На рис. 3.32 приведена часть условной схемы обмотки с $q = 4\,{}^{3}\!/_{5}$. Цифры под диагоналями прямоугольников повторяют найденное в описанном примере чередование больших и малых катушечных групп.

В практике построения трехфазных обмоток с дробным q избегают применять знаменатель дробности, равный или кратный трем, так как в этом случае симметрия обмотки трехфазных машин нарушается. При необходимости применить обмотку со знаменателем дробности d, равным или кратным трем, следует провести более глубокий анализ возможных вариантов [13].

Начала фаз в обмотках с дробным q, так же как и в обмотках с целым q, должны быть выбраны через 120°·k, т. е. через 120°·k/αz = $2q$k пазовых делений, где k — целое, не кратное трем, число. Однако при дробном q произведение $2q$k не при всяком k будет равно целому числу пазовых делений (за исключением обмотки, в которой $d = 2$). Поэтому в обмотках с дробным q при определении положения начал фаз множитель k необходимо выбирать таким, чтобы произведение $2q$k было равно целому числу, при этом k не должно быть кратным трем. Наименьшее возможное расстояние между началами фаз, выраженное в пазовых делениях, будет:

при d четном (k = d/ 2)

$$2qk = \frac{2N}{d}\frac{d}{2} = N; \tag{3.23}$$

при d нечетном (k = d)

$$2qk = \frac{2N}{d}d = 2N; \tag{3.24}$$

Большую работу по расчету и внедрению в серию RA обмоток дробным q провел на ЯЭМЗ В.И. Попов [13]. Там же приведен целый ряд новых схем обмоток с дробным q.

3.10. СХЕМЫ ОБМОТОК ДЛЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ УКЛАДКИ

Современные обмоточные станки работают по принципу либо поочередной укладки каждого проводника обмотки в пазы статора по шагу обмотки, либо втягивания в пазы с торца статора одновременно пучка проводников, принадлежащих одной или нескольким катушечным группам. И тот, и другой способы применимы только для обмоток, не требующих при укладке подъема шага, т. е. временного подъема из пазов сторон первых уложенных катушек. Кроме того, более прогрессивный способ укладки путем втягивания катушечных групп с торца статора применим только для обмоток из концентрических катушек. Этому требованию полностью удовлетворяют однослойные концентрические обмотки. Двухслойные обмотки, схемы которых рассмотрены выше, требуют при укладке обязательного подъема шага. Поэтому в последние годы для механизированной укладки разработан ряд новых схем, при которых обмотки с сохранением их симметричности можно укладывать в пазы без подъема шага, как однослойные, и в то же время выполнять их с укорочением шага, как двухслойные. К наиболее распространенным видам таких обмоток относятся одно-двухслойные и двухслойные концентрические [2].

Одно-двухслойная обмотка представляет собой как бы сочетание катушек однослойной и двухслойной обмоток (рис. 3.33). В обычной двухслойной обмотке с укорочением шага при $\beta \geq 2/3$ в ряде пазов располагают стороны катушек, принадлежащие одной и той же фазе (см., например, рис. 3.24 — пазы 1, 7, 13 и др.), а в других пазах размещены стороны катушек разных фаз. В одно-двухслойных обмотках в пазах, в которых расположены стороны катушек одной и той же фазы, помещают однослойную катушку (большую) с двойным числом витков. На схеме (рис. 3.33) такие катушки показаны пиниями двойной толщины. В остальных пазах размещены в два слоя стороны малых катушек разных фаз. Обмотка выполняется кон-

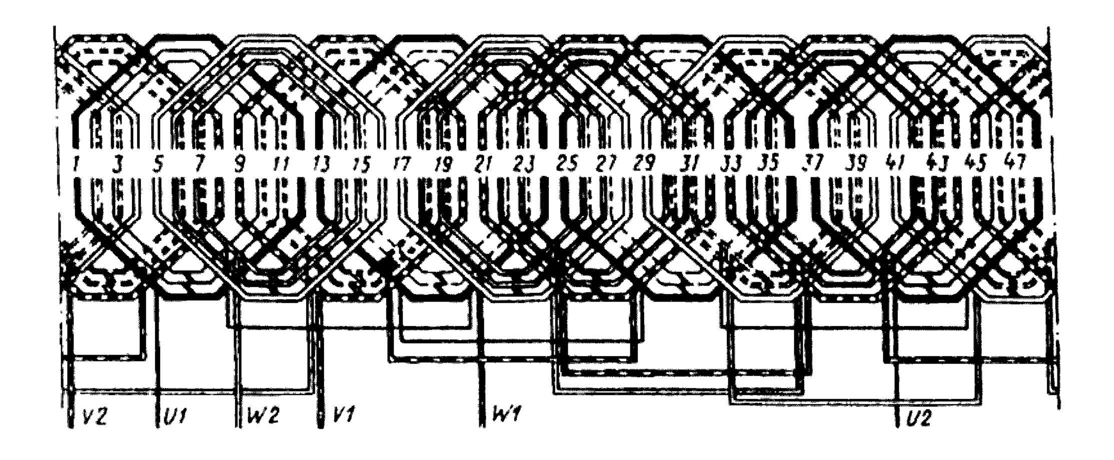


Рис. 3.33. Схема одно- двухслойной обмотки, Z = 48, $2p = 4$, $a = 1$, $q = 4$

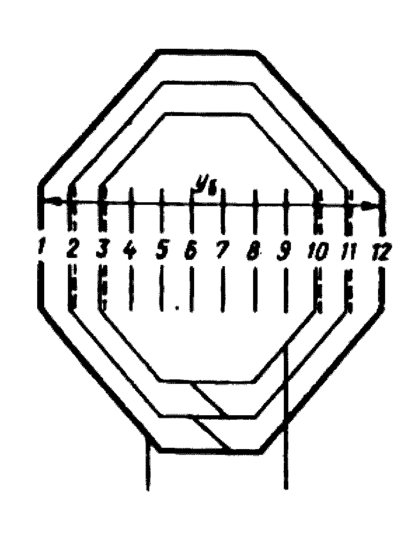


Рис. 3.34. Катушечные группы одно-двухслойной обмотки при $q = 4$, $y_б$ – шаг большой катушки (катушки с большим числом витков)

центрическими катушками. Число катушечных групп равно числу полюсов. В трехфазных обмотках катушечную группу (рис. 3.34) обычно выполняют из одной большой и q - 2 малых катушек (всего q - 1 катушка в группе). Шаг большой катушки равен $y_б$ τ - 1. Такая обмотка выполнима только при $q \geq 3$. При $q = 2$ она превращается в концентрическую однослойную обмотку, выполненную вразвалку.

Анализ векторных диаграмм пазовых ЭДС одно-двухслойной обмотки показывает, что ее обмоточный коэффициент, так же как и у двухслойной можно представить в виде произведения $k_{об} = k_р\, k_у$. Коэффициенты распределения $k_р$ и укорочения $k_у$, рассчитывают по обычным для двухслойных обмоток формулам (3.11) и (3.13).

Укорочение шага в одно-двухслойной обмотке определяют по расчетному шагу (3.8) и (3.9), и для трехфазных обмоток с одной большой катушкой в группе

$$\beta = \frac{y_{расч}}{\tau} = \frac{2}{3}\frac{q+1}{q}; \qquad (3.25)$$

Для обмоток с $q = 4$ и $q = 5$ укорочение β соответственно равно 0,83 и 0,8, т. е. близко к укорочению шага, выполняемому в двухслойных обмотках.

Двухслойная концентрическая обмотка (рис. 3.35) строится на базе обычной двухслойной обмотки с тем же числом 2р и q и отличается от нее соединениями в лобовых частях и шагом катушек. Катушечные группы в этой обмотке выполнены из концентрических катушек. Шаг наибольшей катушки равен числу пазовых делений между первой и последней сторонами катушек одной катушечной группы базовой двухслойной обмотки. Принцип построения обмотки ясен из сравнения схем, изображенных на рис. 3.35 и 3.24. Определенная последовательность катушечных групп концентрической обмотки позволяет уложить на обмоточном станке за несколько переходов всю обмотку без подъема шаговых сторон катушек.

Коэффициенты распределения и укорочения двухслойной концентрической обмотки рассчитывают по формулам (3.11) и (3.13). Следует отметить, что укорочение двухслойной концентрической обмотки, определенное по расчетному шагу (3.7), равно укорочению шага двухслойной обмотки, на базе которой она построена. Так, например,

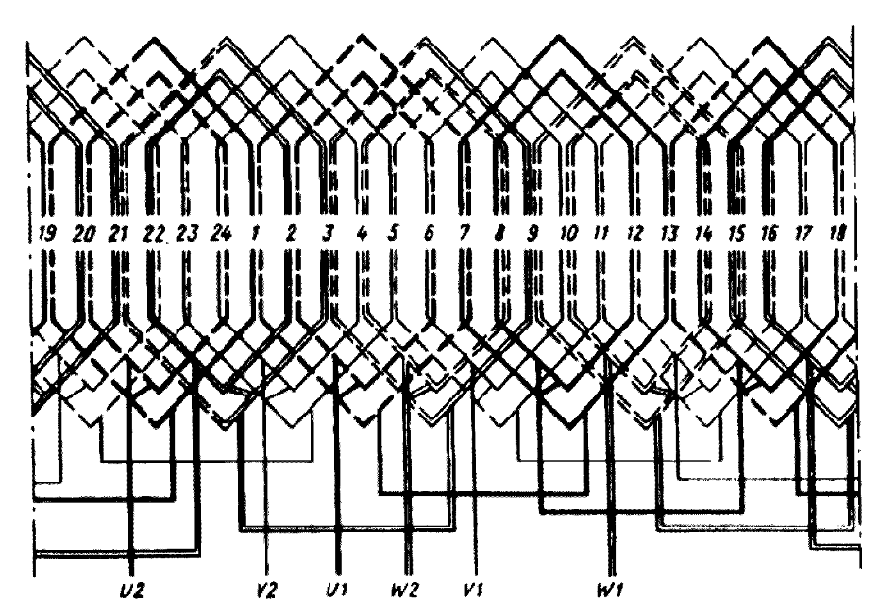


Рис. 3.35. Схема двухслойной концентрической обмотки,
$Z = 24$, $2p = 4$, $a = 1$, $q = 2$

укорочение шагов обмоток, схемы которых приведены на рис. 3.24 и 3.35, одинаково и равно $\beta = 5/6$.

Катушечные группы, уложенные на станке концентрической обмотки, не полностью идентичны из-за различного положения сторон катушек в пазах. Это приводит к некоторому неравенству индуктивных сопротивлений различных катушечных групп. Поэтому двухслойная концентрическая обмотка может быть соединена в несколько параллельных ветвей только при условии, если в каждой из них будет содержаться одинаковое число катушечных сторон, расположенных в нижних и верхних слоях пазов. Это дополнительное условие несколько ограничивает возможность образования параллельных ветвей обмотки.

Концентрическая обмотка имеет несколько меньшие вылеты по сравнению с обычной двухслойной, что уменьшает среднюю длину витка, а следовательно, и массу обмоточной меди и осевую длину обмотанного статора.

3.11. ОСОБЕННОСТИ СХЕМ ОБМОТОК МНОГОСКОРОСТНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статорах многоскоростных асинхронных двигателей применяют обмотки, которые могут быть включены на различное число полюсов. Частота вращения двигателя изменяется при этом ступенчато, обратно пропорционально числу полюсов обмотки. Изменения числа полюсов двигателя можно достичь двумя путями: установкой в пазы статора двух независимых друг от друга обмоток, выполненных на различные числа

полюсов, или переключением схемы соединения катушечных групп одной обмотки. Обмотки, рассчитанные для такого способа переключения, называют полюсно-переключаемыми.

Укладка в статор двух независимых обмоток дает возможность получить любые соотношения между числами их полюсов и, следовательно, между частотами вращения двигателя. Недостатком такого способа является неполное использование объема паза статора, так как в пазы укладывают проводники двух обмоток, а двигатель работает на одной из них поочередно. Одна из обмоток во время работы двигателя отключается от сети, и занятая ею часть объема паза не используется. Это приводит к увеличению размеров пазов и всего двигателя по сравнению с односкоростным той же мощности.

Способ изменения числа полюсов в полюсно-переключаемых обмотках основан на изменении направлений магнитных потоков в машине путем переключения схемы обмотки. На рис. 3.36, а схематично показано поперечное сечение статора и ротора двигателя и положение двух (7-й и 4-й) катушечных групп, принадлежащих первой фазе двухполюсной обмотки. Стрелками отмечено направление магнитных силовых линий потока машины. На схеме соединения катушечных групп этой фазы также стрелками показано направление обтекания их током, причем направление стрелки над катушечной группой вправо соответствует направлению силовых линий потока от центра, а влево — к центру. На рис. 3.36, б такое же построение показано для четырех полюсной машины, одной фазе обмотки которой принадлежат 1, 4, 7 и 10-я катушечные группы. При встречном включении катушечных групп, т. е. при принятой в обычной двухслойной обмотке схеме, магнитное поле образует четыре полюса.

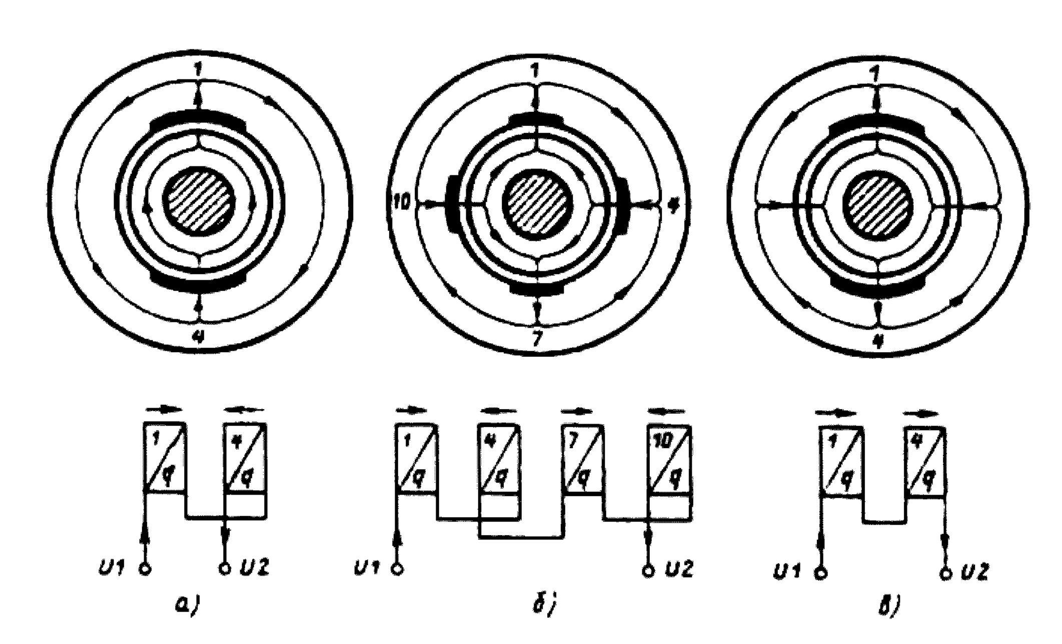


Рис. 3.36. Потоки в магнитопроводе и условные схемы обмоток:
а – с двумя катушечными группами при 2р = 2; б – с четырьмя катушечными группами при 2р = 4; в – с двумя катушечными группами при 2р = 4

Такую же картину поля можно получить и при двух катушках в одной фазе, если их включить не встречно, а согласно рис. 3.36, в. Сравнивая направления силовых линий потоков и схемы обмоток, видим, что изменение направления тока в половине катушечных групп двухслойной обмотки приводит к изменению числа ее полюсов в 2 раза.

На этом принципе построены двухскоростные полюсно-переключаемые обмотки, в которых числа полюсов изменяются в 2 раза. Двухскоростные обмотки выполняют с шестью выводами. При работе на одном числе полюсов три вывода подключают к сети, а три оставшихся в зависимости от схемы обмотки либо замыкают накоротко, либо оставляют свободными. Обозначения выводов многоскоростных обмоток согласно ГОСТ 26772—85 приведены в табл. 3.17.

Таблица 3.17 Обозначение выводов многоскоростных двигателей, разработанных после 1987 г. (по ГОСТ 26772 – 85)

Число выводов	Наименование вывода фазы	Обозначение выводов	
		начало	конец
6	Первый	1U— 2*N*	2U
	Второй	1V—2*N*	2V
	Третий	1W—2*N*	2W
9	Первый	1U – 3*N*	2U; 3U
	Второй	1V – 3*N*	2V; 3V
	Третий	1W – 3 *N*	2W; 3W
12	Первый	1U — 2*N*	2U
		3U—4*N*	4U
		1V—2*N*	2V
	Второй	3V – 4*N*	4V
		1W – 2*N*	2W
	Третий	3W – 4*N*	4W

Примечания. 1. В обозначениях раздельных обмоток двигателей, переключаемых на разное число полюсов, меньшая (большая) цифра стоящая перед буквенным обозначением обмотки, соответствут меньшей (большей) частоте вращения.

2. Двойные обозначения (например, 1U – 2*N*; 1U – 3*N* и др.) применяют для выводов, которые при одной частоте вращения присоединяют к сети, а при другой частоте вращения замыкают накоротко между собой. Если на доске выводов нет достаточно места для двойного обозначения с обязательным приложением к машине схемы соединений.

3. В чертежах электрических схем соединения с шестью выводными концами на свободном поле схемы при соединении фаз в треугольник допускается применение двойных обозначений (U1W2; V1U2; W1V2), при соединении фаз в звезду – обозначение начал фаз U1, V1, W1 и тройного обозначения (U2; V2; W2) точки звезды.

Выбор схемы полюсно-переключаемых обмоток зависит от того, должен двигатель работать на разных частотах вращения с постоянным моментом или с постоянной мощностью [6].

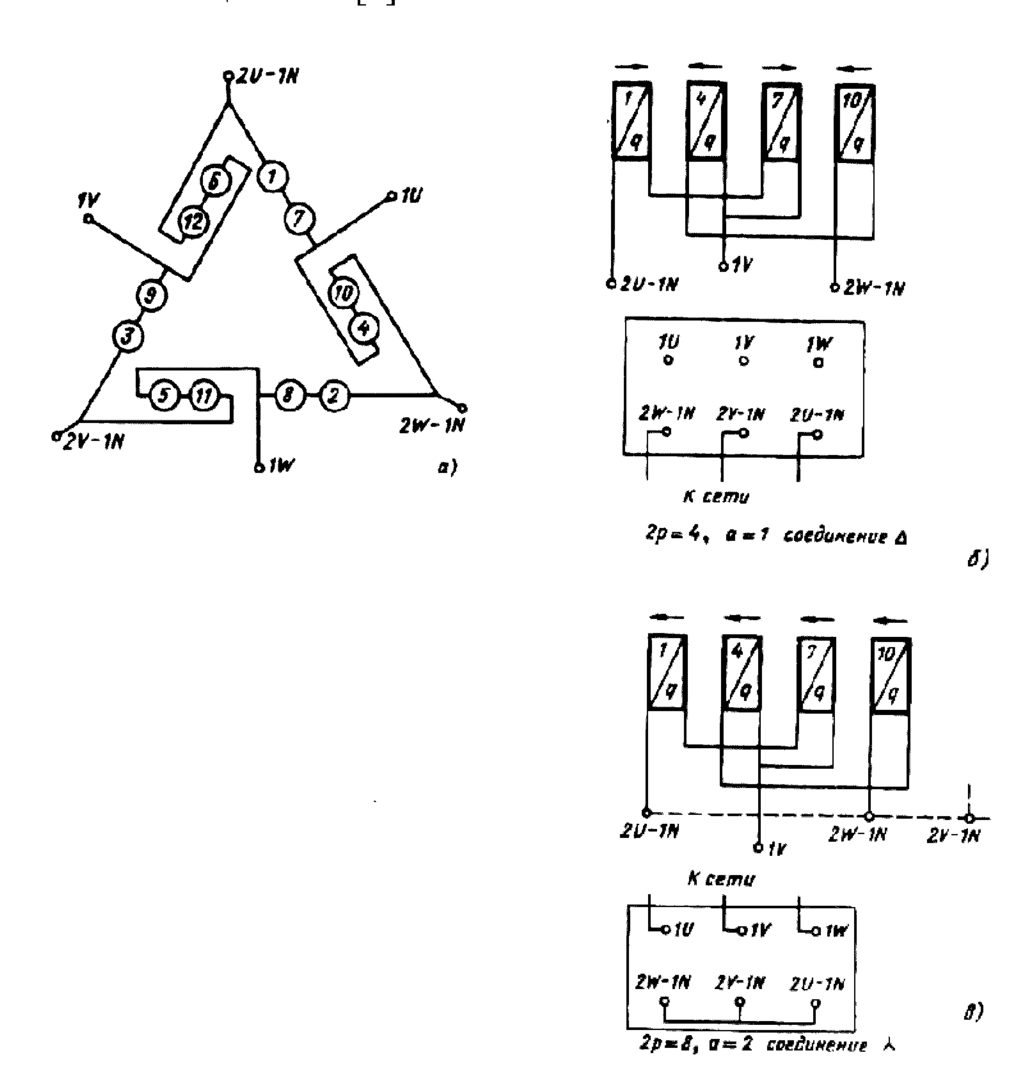


Рис. 3.37. Схемы включения обмоток многоскоростного асинхронного двигателя на 2р = 4/8 при работе с постоянной мощностью:
а схема соединений катушечных групп обмотки; б – включения обмотки на 2р = 4 при *а* = 1; в – включение обмотки на 2р = 8 при *а* =2.

На рис. 3.37 показаны условные схемы включения двухскоростного асинхронного двигателя на 2р = 4/8, рассчитанного на работу с одной и той же мощностью при 2р = 4 и 2р = 8. На высшей частоте вращения (2р – 4) его обмотку соединяют в треугольник при *а* = 1, а на низшей (2р = 8) — в звезду при *а* = *2*. При том и при другом числе полюсов катушки обмотки остаются теми же самыми, поэтому их выполняют с шагом, равным или несколько большим полюсного деления при большем числе полюсов.

Существуют схемы обмоток двухскоростных двигателей, позволяющие путем переключения катушечных групп изменять числа полюсов и в отношении, отличном от 1 : 2, с сохранением достаточно высокого

обмоточного коэффициента для обеих частот вращения и числа выводных концов обмоток — не более шести. Особенность этих схем заключается в специфической компоновке катушечных групп из разновитковых катушек, при которой изменение точек подсоединения обмотки к питающей сети приводит не только к изменению полярности отдельных катушечных групп, но и переключению групп между фазами или к отключению отдельных катушек при работе с одним из возможных чисел полюсов. При переключениях изменяется также и амплитуда МДС обмотки, поэтому такой метод построения схем называют методом «полюсно-амплитудной модуляции» (ПАМ). Принцип переключений, характерный для данного метода, иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 3.38.

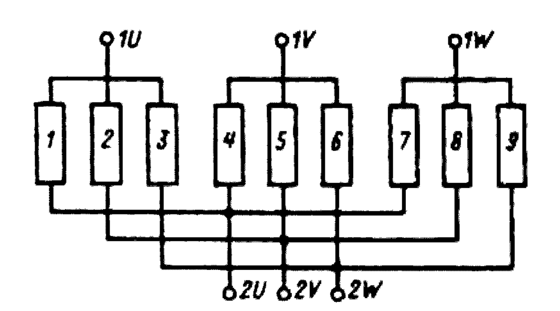


Рис. 3.38. Принципиальная схема двухскоростной обмотки, выполненной по принципу ПАМ:
1 – 9 - элементы обмотки

Двухскоростные асинхронные двигатели серии 4А и АИ с высотами осей вращения 160…200 мм при соотношении чисел полюсов 6 : 4 имеют две обмотки: основную – двухслойную и дополнительную – однослойную, катушечные группы которых условно показаны на рис. 3.39, *а* соответственно кружками и прямоугольниками. Основная обмотка — полюсно – переключаемая. При работе на 2р = 4 включается только основная обмотка, соединенная треугольником при *а* – 1 (рис. 3.39, б). При работе двигателя на 2р = 6 основная обмотка соединяется в звезду с двумя параллельными ветвями и последовательно с ней включается дополнительная обмотка (рис. 3.39, в).

Для трехскоростных и четырехскоростных асинхронных двигателей используют оба принципа изменения чисел полюсов: устанавливают две независимые обмотки, каждая из которых (в четырехскоростных) или одна из них (в трехскоростных двигателях) выполняется полюсно-переключаемой.

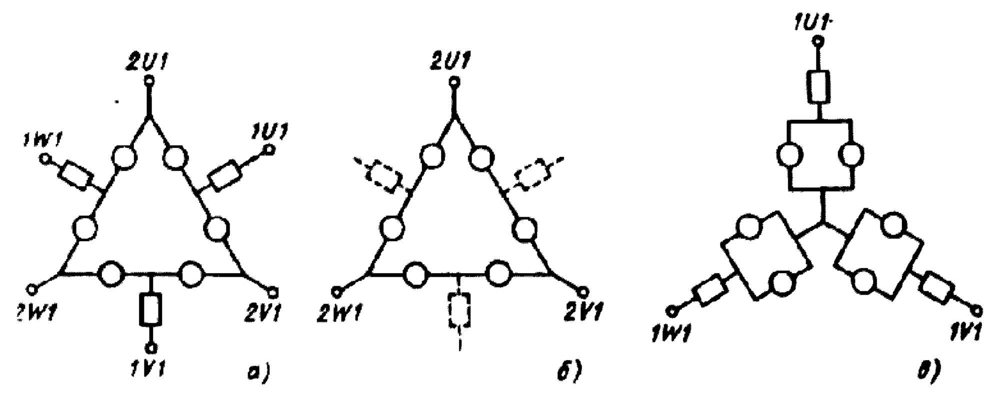


Рис. 3.39 Полюсно – переключаемые обмотки:

а – выводы обмотки; б – включение основной обмотки на 2р = 4 при a = 1; в – включение основной и дополнительной обмоток на 2р = 6 при a = 2;

-○- - элементы основной обмотки, -□- - элементы дополнительной обмотки

В обмотках в большинстве случаев используют более простые схемы переключения числа полюсов в отношении 1 : 2. Так, например, трехскоростные двигатели 4А112М6/4/2 имеют две независимые обмотки, одна из которых рассчитана на 6 полюсов, а вторая (полюсно-переключаемая) — на 2 и 4 полюса; в четырехскоростных двигателях 4А180М12/8/6/4 обе обмотки полюсно – переключаемые: одна на 12 и 6 полюсов, другая на 8 и 4 полюса.

3.12. ОБМОТКИ ФАЗНЫХ РОТОРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

По своей конструкции и схемам соединения обмотки фазных роторов машин переменного тока. В роторах машин мощностью до 80...100 кВт обычно применяют катушечные обмотки. Конструктивно катушечные обмотки фазных роторов отличаются от статорных только расположением лобовых частей и наличием на них бандажей. В схемах отличие состоит в выборе начал фаз обмотки. Если расстояние между началами фаз обмотки статора выбирается минимально возможным для обеспечения большей компактности расположения выводных концов, то в обмотке ротора их стремятся расположить равномерно по окружности, чтобы облегчить балансировку обмотанного ротора.

С увеличением размеров машины уменьшается число витков в обмотке статора. Соответственно должно уменьшиться и число витков обмотки ротора, так как иначе напряжение на контактных кольцах возрастает, что может послужить причиной пробоя изоляции во время пуска машины. Поэтому в машинах больших габаритов обмотку ротора выполняют стержневой, имеющей всегда два эффективных проводника в пазу. Число витков в обмотке ротора при этом уменьшается, а ток ротора возрастает. Поэтому обмотку выполняют из прямоугольной меди или медных шин с площадью поперечного сечения, много большей, чем сечение проводников обмотки статора.

Стержневую обмотку ротора, как правило, делают волновой, так как в волновой обмотке меньше межгрупповых соединений, которые технологически трудновыполнимы при большом сечении проводников.

Основные закономерности соединений схем волновых обмоток фазных роторов рассмотрим на следующем примере. Составим схему стержневой волновой обмотки ротора, имеющего число пазов Z_2 24 и число полюсов $2p_2$ = 4. На рис. 3.40, a показаны 24 линии пазов, в которых расположены проводники верхнего слоя обмотки. Разметим эти пазы по фазам,

предварительно определив полюсное деление $\tau_2 = Z_2 / 2p_2 = 24/4 = 6$ пазовым делениям и число пазов на полюс и фазу $q_2 = Z_2/(2p_2m_2) = 24/(4 \cdot 3) = 2$.

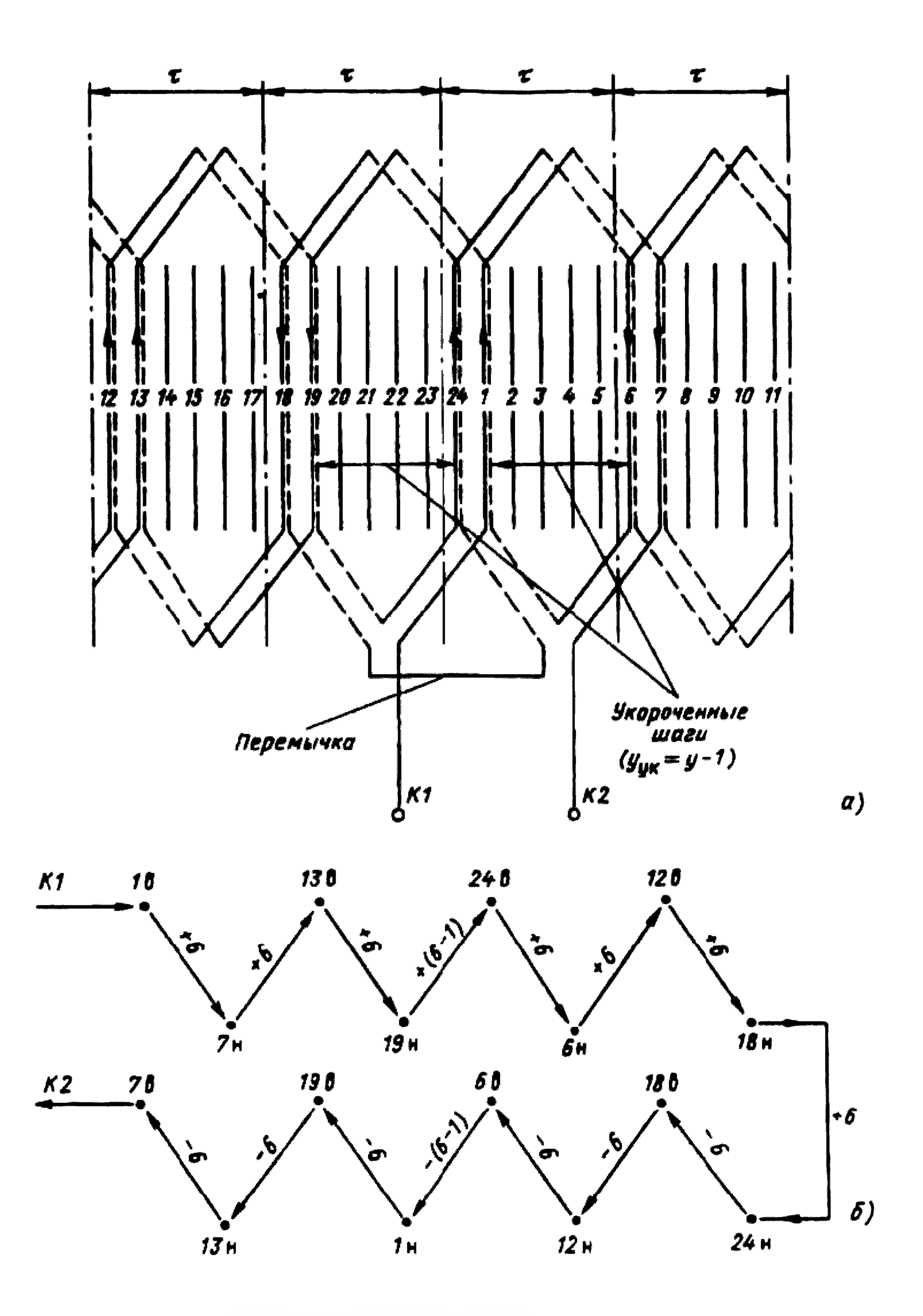


Рис. 3.40. К построению схемы стержневой волновой обмотки фазного ротора асинхронного двигателя, Z = 24, 2p = 4:
а – схема соединений одной фазы; б – последовательность соединения стержней

Стрелками на линиях укажем для первой фазы направления мгновенных значений токов в стержнях (одинаковые в пределах каждого полюсного

деления и изменяющиеся на обратные при переходе на соседние полюсные деления) и начнем построение схемы обмотки, приняв за начало первой фазы (К1) верхний стержень, лежащий в первом пазу.

Обмотку выполняют с диаметральным шагом. В данной схеме шаг обмотки по пазам $y = \tau_2 = 6$ зубцовых делений. Обмотка двухслойная, поэтому верхний стержень из паза 1 должен быть соединен с нижним стержнем паза $1 + y = 1 + 6 = 7$. Далее нижний стержень паза 7 соединяется с верхним стержнем паза $7 + y = 7 + 6 = 13$ и т. д. Одновременно с вычерчиванием схемы целесообразно записывать последовательность шагов обмотки (рис. 3.40, б).

Проделав таким образом $2p_2 — 1 = 4 — 1 = 3$ шага, убеждаемся, что при следующем — четвертом (по числу полюсов) шаге обмотка замкнется сама на себя, так как $2p_2\tau_2 = Z_2$. При построении схемы этот шаг укорачивают или удлиняют на одно зубцовое деление, т. е. делают его равным $y - 1$ или $y + 1$. Чаще встречаются схемы с укороченными переходными шагами, так как они приводят к некоторой экономии меди обмотки. При удлиненном шаге возникают дополнительные перекрещивания лобовых частей верхнего и нижнего слоев у выхода стержней из паза.

Укороченным (или удлиненным) шагом завершается первый обход обмотки по окружности ротора. После q_2 таких обходов (в рассматриваемом примере — после двух обходов) изменение последнего шага производить нельзя, так как это приведет обмотку данной фазы к стрежням соседней. Для соединения оставшихся после первых q_2 обходов стержней фазы последний стержень, на котором занимающим такое же положение в пазу на расстоянии шага от него в направлении обхода, т. е. нижний стержень паза 18 соединяют с нижним стержнем паза $18 + 6 = 24$. Далее продолжают обход в том же порядке, но изменив его направление. Построение обмотки заканчивается после q_2 обходов в обратном направлении.

Начала других фаз обмотки располагают симметрично через $2p_2q_2$ пазовых делений, т. е. через 1/3 окружности ротора (см. § 3.5).

Полная схема обмотки, построение которой начато в примере на рис. 3.40, приведена на рис. 3.41. За начала фаз приняты верхние стержни, расположенные в пазах 1, 9 и 17. Рассмотренная обмотка является типичной для стержневых волновых обмоток фазных роторов асинхронных двигателей.

Отметим некоторые особенности обмоток данного типа. В стержневой волновой обмотке имеется только по одной перемычке на фазу независимо от числа полюсов, в то время как в катушечных двухслойных обмотках таких перемычек — межгрупповых соединений — необходимо установить $2p - 1$ на каждую фазу. Это обстоятельство существенно облегчает соединение схемы, особенно в многополюсных машинах. При симметричном расположении начал фаз также симметрично располагают перемычки и концы фаз. Если за

начала фаз приняты верхние стержни пазов, то концами фаз также будут верхние стержни, а перемычки соединяют с нижними стержнями.

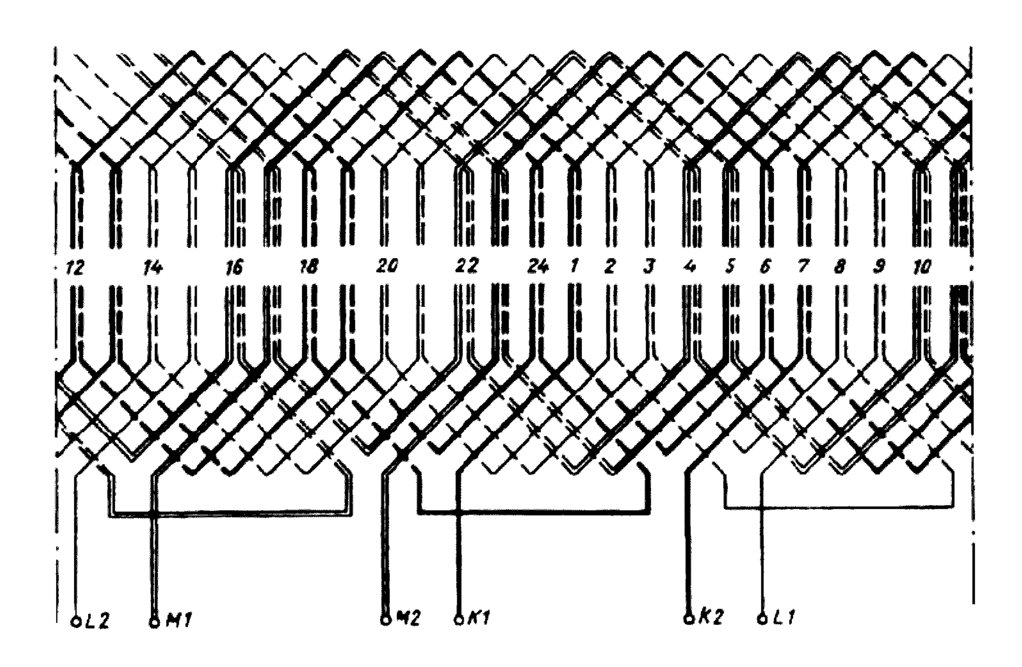


Рис. 3.41. Схема стержневой волновой обмотки фазного ротора, Z = 24, $2p = 4$, $a = 1$

Находят применение также некоторые модификации рассмотренных схем обмоток роторов. Иногда в схемах выполняют укороченные переходные шаги по обходу ротора в одну сторону и удлиненные — в другую. В таких схемах перемычки смещаются на несколько пазовых делений, поэтому конструктивно выводные концы фаз не пересекаются с перемычками, что облегчает крепление лобовых частей.

Распространены также схемы обмоток фазных роторов, выполняемых без перемычек. В таких обмотках в каждой из фаз на месте последнего при прямом обходе стержня, который в обычных схемах соединяют с перемычкой (см., например, на рис. 3.41 нижние стержни в пазах 2, 10, 18), устанавливают изогнутый переходной стержень. На схеме одной фазы обмотки без перемычек (рис. 3.42) переходной стержень размещен в 26-м пазу (отмечен кружком на схеме). Переходной стержень изгибается так, что одна половина его по длине находится в нижнем слое паза, а другая — в верхнем. Обе лобовые части стержня отгибают в одну и ту же сторону. После установки переходного стержня направление обхода меняется на обратное так же, как после установки перемычек в рассмотренных ранее схемах. В такой обмотке концы фаз располагают на противоположной от начал фаз стороне ротора.

Отсутствие перемычек упрощает конструкцию обмоток и технологию соединения схемы. Расположение начал и концов фаз на разных торцах ротора облегчает установку выводных концов и соединительной шины на конечных выводах обмотки для соединения ее в звезду.

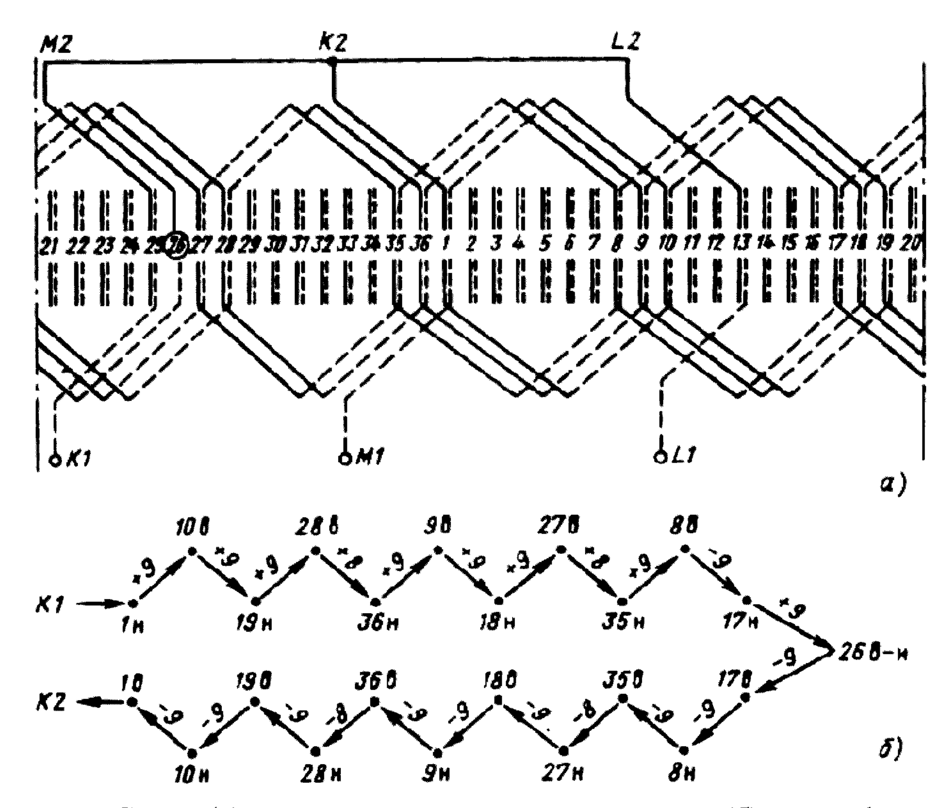


Рис. 3.42. Схема (а) и последовательность соединения (б) одной фазы стержневой волновой обмотки фазного ротора с переходным стержнем, Z = 36, $2p = 4$

В то же время наличие переходных, изогнутых по длине стержней требует их дополнительного крепления в пазах (рис. 3.43).

Волновую стержневую обмотку выполняют с одной и, реже, с двумя параллельными ветвями. Образование большего числа параллельных ветвей технологически сложно. Для получения двух параллельных ветвей перемычку между половинами фаз убирают и каждую часть обмотки соединяют с начальным и конечным выводами фаз сохраняя в них направление тока.

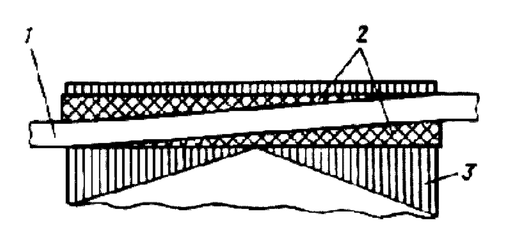


Рис. 3.43. Положение переходного стержня в пазу ротора:
1 – переходный стержень; 2 – уплотняющие клинья;
3 – сердечник ротора

В большинстве случаев стержневые волновые обмотки роторов выполняют с целым число пазов на полюс и фазу. Однако на практике встречаются обмотки и с дробным q_2. При $q_2 = b + c/d$ полюсное деление $\tau_2 = m_2 q_2$ содержит дробное число пазовых делений (обмотки с d, кратным трем, в трехфазных машинах не применяют) и шаг обмотки не может быть диаметральным. Такие обмотки выполняют с различными шагами:

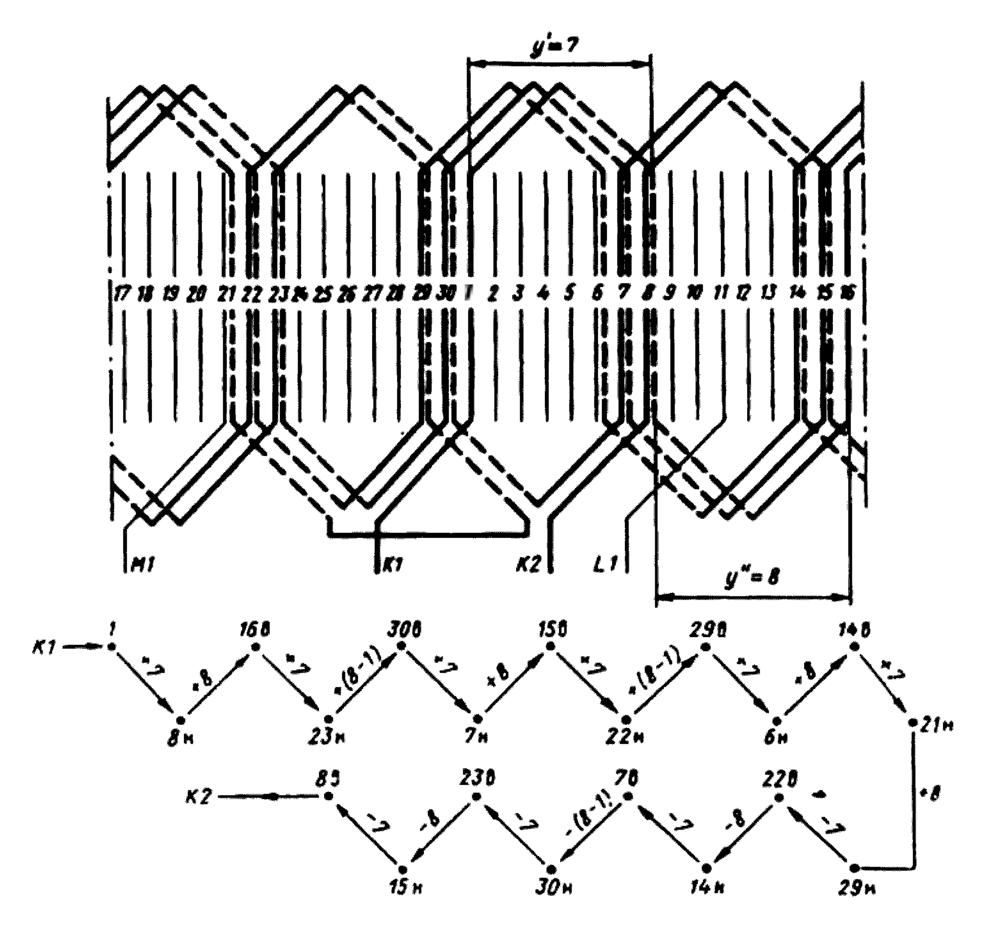


Рис. 3.44. Схема и последовательность соединения одной фазы стержневой волновой обмотки фазного ротора, Z = 30, $2p = 4$, $q = 2\frac{1}{2}$

большими, равными $y' = \tau_2 + \varepsilon_1$ пазовых делений, и малыми, равными $y'' = \tau_2 - \varepsilon_2$ пазовых делений, где ε_1 и ε_2 — наименьшие дробные числа, при которых y' и y'' выражаются целыми числами. Количество больших и малых шагов, а также последовательность соединений стержней в схеме зависят от числа q_2 и находятся аналогично числу и чередованию больших и малых катушечных групп в двухслойных катушечных обмотках с дробным q. Наиболее часто дробные обмотки фазных роторов выполняют при знаменателях дробности d 2, т. е. с $q_2 = 2\frac{1}{2}$, $3\frac{1}{2}$ и т. п. В таких обмотках большие шаги равны $y' = \tau_2 + 1/2$, а малые y'' $\tau_2 - 1/2$ пазовых делений. Схему обмотки строят так же, как и при целом q_2, но большие шаги чередуют с малыми. Последовательность чередования шагов до перемычки и после изменяется на обратную.

На примере схемы обмотки с $q_2 = 2\frac{1}{2}$, приведенной на рис. 3.44, видно, что две (прямая и обратная) ветви обмотки располагают таким образом, что в каждой фазной зоне занято стержнями фазы $q_2 = 2 + 1/2$ паза (три верхние половины паза и две нижние либо наоборот). В оставшейся свободной половине паза размещают стержень, принадлежащий соседней фазе.

3.13. КОНСТРУКЦИЯ И ИЗОЛЯЦИЯ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основным элементом якорных обмоток машин постоянного тока является секция, в которой может быть один или несколько витков. Выводные концы каждой секции соединены с пластинами коллектора. Несколько секций, пазовые стороны которых размещают в одном слое паза, имеют общую корпусную изоляцию и образуют катушку обмотки. Катушка обмотки якоря в отличие от катушки обмотки статора машины переменного тока имеет столько пар выводных концов, сколько секций она имеет в своем составе (рис. 3.45).

В большинстве машин общего назначения мощностью до 30...40 кВт обмотки выполняют из круглого, а в машинах большей мощности — из прямоугольного обмоточных проводов. Обмотки из круглого провода укладывают в полузакрытые пазы (рис. 3.46, а). Плотность укладки проводников оценивается коэффициентом заполнения паза (см. § 3.4).

Пример исполнения изоляции обмоток из круглого провода приведен в табл. 3.18. Корпусная изоляция пазовой части катушек выполнена пазовым коробом из одного или двух слоев изоляционного материала. Для повышения надежности короба в местах выхода его из пазов по торцам якоря он завернут в виде манжеты. Прокладки между слоями обмотки в пазу выполнены из того же материала, что и короб. В лобовых частях секции и катушки дополнительно не изолируют.

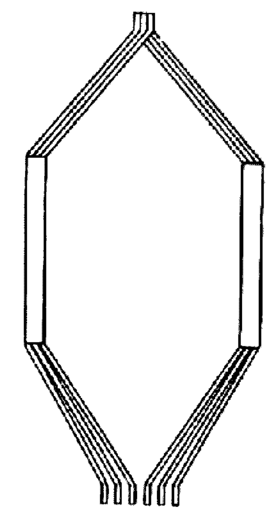


Рис. 3.45 Катушка обмотки якоря машины
постоянного тока, состоящая из трех секций

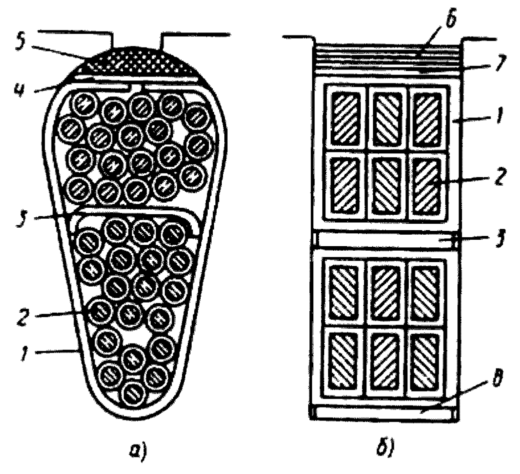
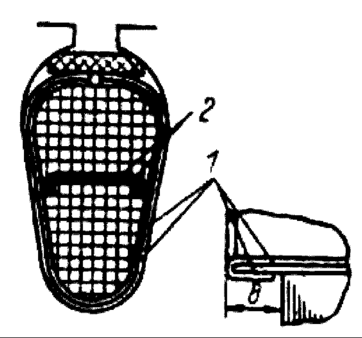


Рис. 3.46 Поперечный разрез пазов якоря
а – с обмоткой круглого провода; б – с обмоткой из прямоугольного провода;
1 – корпусная изоляция; 2 – проводники обмотки;
3 – прокладки между слоями обмотки; 4 – прокладки под клин;
5 – пазовый клин; 6 – проволочный бандаж;
7 – прокладка под бандаж; 8 – прокладка на дне паза

Таблица 3.18. Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы овальные полузакрытые; обмотка двухслойная всыпная из круглого эмалированного провода; напряжение до 600 В)



Высота оси вращения h, мм	Позиция	Материал			Число слоев	Односторонняя Толщина изоляции, мм
		Класс нагревостойкости		Толщина, мм		
		В	F и H			
80-112	1	Изофлекс	Имидофлекс	0,35	1	0,35
	2	"	"	0,35	1	0,35
132-200	1	"	"	0,25	2	0,5
	2	"	"	0,25	2	0,5

Примечание. Прокладку между катушками в лобовых частях обмотки выполняют из изофлекса.

В табл. 3.19 показано исполнение изоляции обмоток якоря двигателей 4П100 и 4ПФ132. Обмотки рассчитаны на механизированную укладку. Проводники закреплены в пазах пазовыми крышками, выполненными из того же материала, что и короб.

Таблица 3.19. Изоляция обмотки якоря двигателей серии 4П (пазы полузакрытые, обмоточный провод ПЭТ-155; двигатели 4П с h = 80...160 мм — рис. а; двигатели 4ПФ с h = 112...200 мм — ряс. б)

Рисунок	Позиция	Материал	Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
	1	Пленкокартон ПСК – А – 175	1	0,3
	2	То же	1	0,3

Продолжение табл. 3.19.

Рисунок	Позиция	Материал	Число слоев	Односторонняя толщина изоляции, мм
	1	Плекокартон ПСК – ЛП – 125	1	0,35
	2	То же	1	0,35
	3	“	1	0,35

В обмотке из прямоугольного провода проводники располагают своей широкой стороной параллельно боковой грани паза (рис. 3.46, б), причем проводники одной секции укладывают друг над другом, а пазовые стороны секций, составляющих одну катушку, — в одном по высоте слое паза — в верхнем или в нижнем. Подобное расположение принято для выравнивания индуктивного сопротивления секций, принадлежащих одной катушке, так как оно существенно зависит от размещения проводников по высоте паза.

Число витков в секции обмотки из прямоугольного провода обычно не превышает одного-двух, реже — трех или четырех витков. Одновитковые секции могут быть выполнены стержневыми, что облегчает их укладку в пазы, но делает необходимой дополнительную операцию — пайку головок стержней друг с другом после укладки обмотки. Секции с двумя и с большим числом витков выполняют, если это позволяет место, с двойными головками, что облегчает соединение выводов секций с пластинами коллектора и несколько уменьшает вылет лобовых частей катушек, а следовательно, и общую длину машины (рис. 3.47).

Обмотки из прямоугольного провода имеют гильзовую или непрерывную изоляцию (табл. 3.20—3.22). В машинах на напряжение свыше 600 В дополнительно изолируют промежуточные (средние, через одну) секции в пазовых и лобовых частях.

Обмотку якоря закрепляют в пазах клиньями или бандажами. Для крепления обмоток из круглого провода пользуются только клиньями. Обмотку из прямоугольного провода в двигателях с высотой оси вращения не более 315 мм большей частью крепят в пазовой части бандажами из стальной немагнитной проволоки или из нетканой стеклоленты.

Таблица 3.20. Изоляция обмотки машин постоянного тока (пазы открытые, обмотки из прямоугольного провода, h = 225…315 мм, напряжение 600 В)

Часть обмотки	Позиция	Материал			Число слоев				Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Наименование, марка			Толщина, мм		Класс нагревостойкости		По ширине	По высоте при w_s			
		Класс нагревостойкости			Класс нагревостойкости					1	2	3	4
		B	E	H	B	F и H	B	F и H					
Пазовая	1	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синфолий F	Синфолий H	0,15	0,16	4,5 оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	2	То же	То же	То же	0,15	0,16	0 - 6		-	-	0,3	0,6	0,9
	3	Стеклолакоткань ЛСП			0,15		1	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
		Стеклотекстолит											
	4	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5
	6	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1	-	0,5	0,5	0,5	0,5
		Допуск на укладку обмотки							0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина или без высоты бандажной канавки)							1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
Лобовая	7	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-934-ТП		Пленка полиимидная ПМ 0,5	0,15		1 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	8	Стеклянная лента ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)							1	1	1	1	1

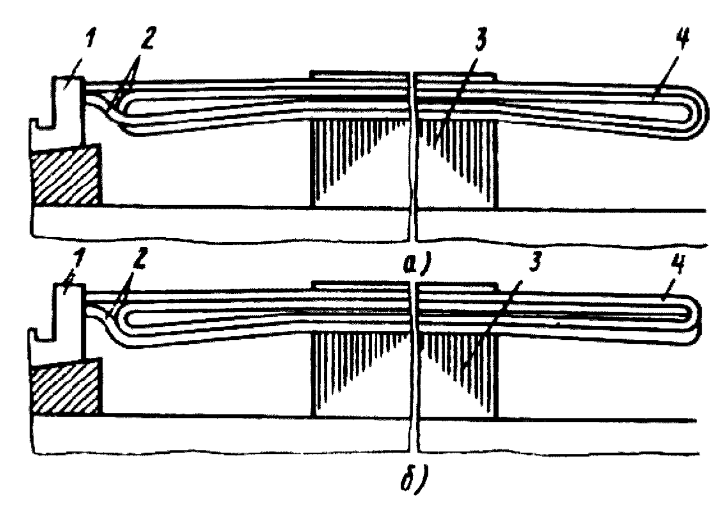


Рис. 3.47. Секции обмотки в пазах якоря:
а – с одинарной головкой; б – с двойной головкой;
1 – пластина коллектора; 2 – выводные концы секции;
3 – сердечник якоря; 4 – головка секции

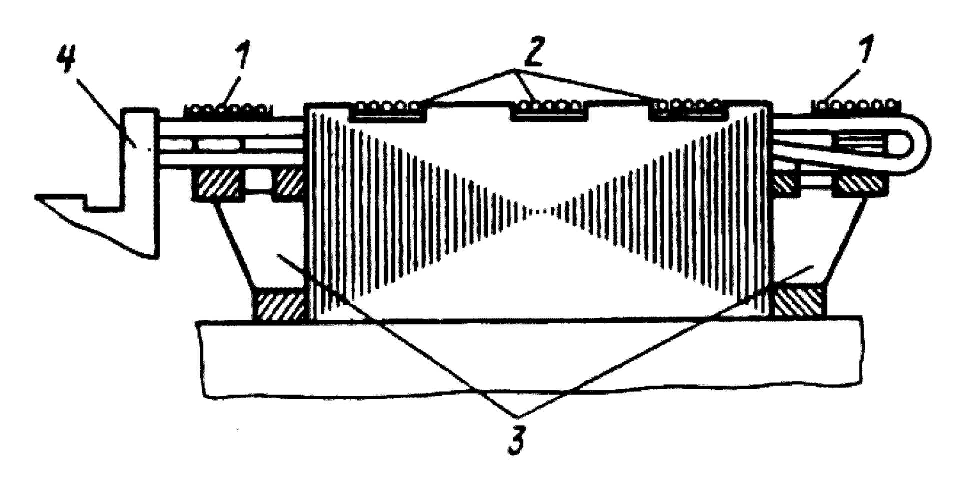


Рис. 3.48. Крепление обмотки якоря бандажами:
1 – бандажи на лобовых частях; 2 – бандажи на пазовой части;
3 – обмоткодержатели; 4 – коллекторная пластина

Бандажи располагают в кольцевых бандажных канавках сердечника якоря (рис. 3.48), которые образуются при шихтовке сердечника листами магнитопровода с меньшим диаметром. По длине якоря располагают несколько канавок; длина каждой из них 15...20 мм, а общая длина всех канавок на якоре обычно не превышает приблизительно 1/3 конструктивной длины сердечника якоря.

В двигателях с $h > 315$ мм пазовые части обмоток крепят клиньями из стеклотекстолита.

Лобовые части всех обмоток якоря крепят бандажами из нетканой стеклоленты, а в машинах больших габаритов и с большой частотой вращения из стальной немагнитной проволоки.

Таблица 3.21. Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы прямоугольные открытые; обмотка двухслойная петлевая, волновая, лягушачья разрезная из прямоугольного провода марки ПСД; h = 350…500 мм; напряжение до 1000 В; класс нагревостойкости В)

Часть обмотки	Позиция	Материал		Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм				
					По ширине при числе $U_п$				По высоте
		Наименование, марка	Толщина, мм		2	3	4	5	
Пазовая	1	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 встык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Лента стеклослюдопластовая ЛИ-СК-ТТ	0,1	1 встык	0,28	0,28	0,28	0,28	1,12
	3	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СКу-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	1,12
	4	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 встык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4
	5	Стеклолакоткань ЛСП-130/155	1	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	6	Стеклотекстолит СТ	0,5	1	-	-	-	-	0,5
	7	То же	0,5	1	-	-	-	-	0,5
	8	“	0,5	1	-	-	-	-	0,5
		Допуск на укладку обмотки	-	-	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5
		Всего на паз (без витковой Изоляции и клина)	-	-	2,14	2,14	2,44	2,54	6,24
Лобовая	9	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 встык	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	10	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 встык	0,28	0,28	0,28	0,28	0,56
	11	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СКу-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56

	12	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впри – тык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Разбухание изоляции от пропитки	-	-	0,3	0,3	0,4	0,5	0,3
		Общая толщина иоляции кату- ши в лобовой чсти (без вит- ковой)	-	-	1,54	1,54	1,64	1,74	2,02

Для обмоток якорей все более широко применяют корпусную изоляцию типа «монолит», состоящую из стеклослюдинитовых или слюдопластовых материалов на эпоксидных связующих. Эта изоляция помимо высокой электрической и механической прочности обладает очень хорошей адгезией. В обмотках с такой изоляцией в ряде случаев можно не устанавливать пазовых клиньев.

Недостатком изоляции типа «монолит» является сложность ремонта обмотки, так как после запечки изоляции удалить обмотку из пазов крайне трудно.

Таблица 3.22. Изоляция обмотки якоря двигателя постоянного тока (пазы прямоугольные открытые); обмотка двухслойная петлевая, волновая, лягушачья разрезная из прямоугольного провода марки ПСД (класс нагревостойкости F) и ПСДК (класс нагревостойкости H); h = 355…500 мм; напряжение до 1000 В

Часть обмотки	Позиция	Материал				Число слоев		Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Наименование, марка		Толщина, мм				По ширине при числе $U_п$				По высоте
		Класс нагревостойкости		Класс нагревостойкости								
		F	H	F	H	F	H	2	3	4	5	
Пазовая	1	Стеклянная лента ЛЭС	Полиамидная пленка ПМ	0,1	0,05	Полиамидная пленка ПМ	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	3	Пленка полиамидная ПМ		0,05		3 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
	4	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	5	Стеклянная лента ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
	6	Фенилоновая бумага		0,2		1		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Стеклотекстолит										
	7	СТЭФ	СТК	0,5		1		-	-	-	-	0,5
	8	СТЭФ	СТК	0,5		1		-	-	-	-	0,5
	9	СТЭФ	СТК	0,5		1		-	-	-	-	0,5
		Допуск на укладку обмотки		-		-		0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
		Всего на паз (без витковой изоляции и клина)		-		-		2,1	2,1	2,3	2,3	5,8
Лобовая	10	Стеклянная лента ЛЭС	Полиамидная пленка ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	11	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	12	Пленка полиамидная ПМ		0,05		2 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	13	Фенилоновая бумага		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	14	Лента стеклянная ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)		-		-		1,2	1,2	1,4	1,4	1,5

3.14. ОСОБЕННОСТИ СХЕМ ОБМОТОК ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Обмотки якоря подразделяют по направлению отгиба лобовых частей на волновые и петлевые и в зависимости от схем соединений на простые и сложные. Соотношения размеров и схемы обмоток характеризуются двумя частичными и результирующими шагами, шагом по коллектору и шагом по пазам якоря (рис. 3.49). Частичные шаги (первый — у1, второй — у2) и результирующий шаг у измеряются в так называемых элементарных пазах, не имеющих эквивалента в линейных размерах. Под элементарным понимают условный паз, в котором как бы расположено по одной секционной стороне обмотки в каждом слое. Отсюда число элементарных пазов $Z_э$, число секций во всей обмотке якоря S, число пластин коллектора К и число пазов якоря Z связаны следующим соотношением:

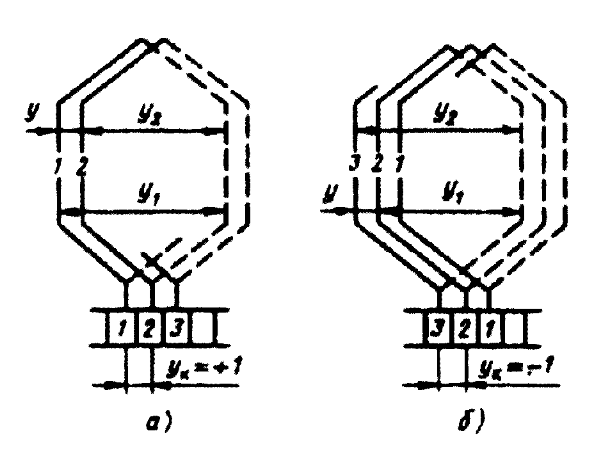


Рис. 3.49. Обозначение шагов петлевой обмотки якоря:
а) $y_к = +1$; б) $y_к = -1$

$$Z_э = S \quad K \quad Z u_п,$$

где $u_п$ — число секций в катушке якоря.

Шаг обмотки по коллектору $y_к$ определяет расстояние между началом и концом секции по окружности коллектора в коллекторных делениях $t_к = (\pi D_к)/K$, где $D_к$ - наружный диаметр коллектора.

Шаг обмотки по пазам (y_Z) определяет расстояние между сторонами катушки или секции в зубцовых делениях якоря $t_Z = (\pi D_a)/Z$, где D_a — наружный диаметр якоря [6].

Схемы обмоток якорей машин постоянного тока изображают на чертежах так же, как и машин переменного тока, т. е. в виде торцевых (вид со стороны коллектора) или развернутых схем. Наибольшее распространение получили развернутые схемы. Их изображение имеет ряд особенностей, связанных с тем, что каждая катушка обмотки якоря состоит из нескольких секций и имеет столько пар выводных концов, сколько секций содержится в ней. Выводные концы секций соединены с пластинами коллектора. Поэтому на схеме обмотки якоря нужно либо каждую секцию изображать отдельным многоугольником, либо показывать пазовые части катушки одной линией, а лобовые части каждой секции — отрезками, соединенными с концами пазовой части и с пластинами коллектора. Последний способ изображения встречается чаще.

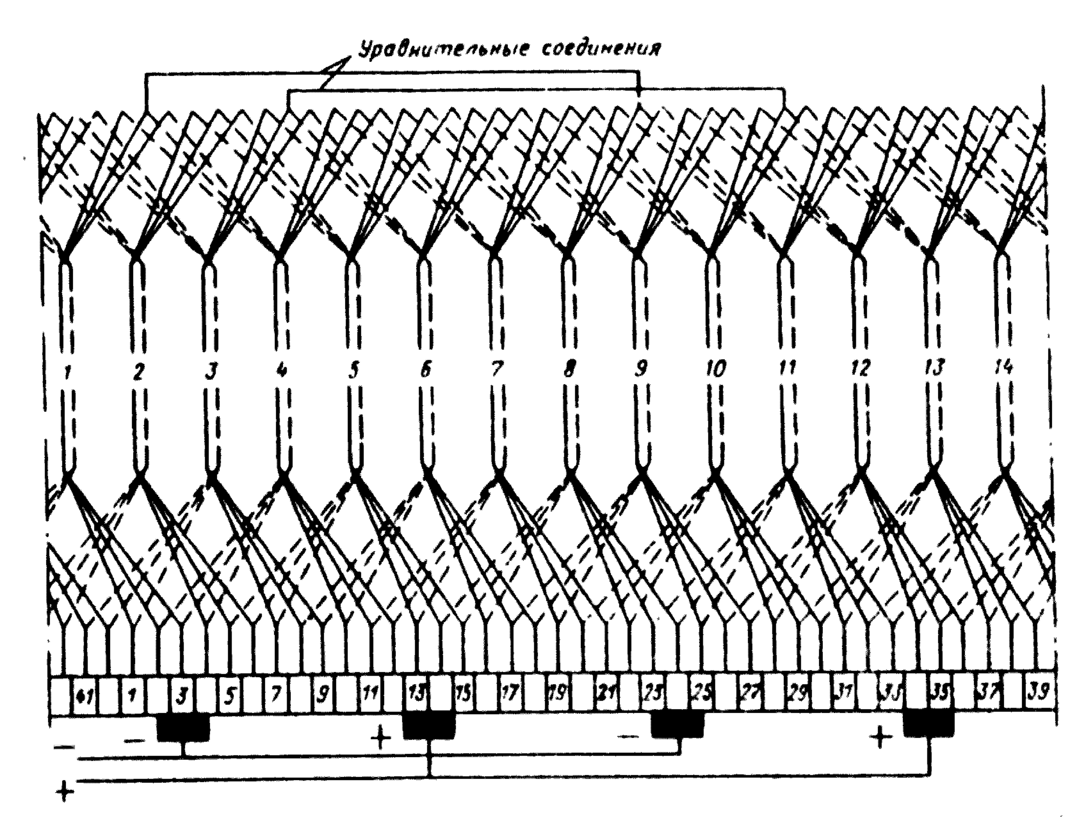


Рис. 3.50. Схема простой петлевой обмотки якоря, Z = 14, $u_п$ = 3, K = 42

На рис. 3.50 приведена развернутая схема простой петлевой обмотки, каждая катушка которой состоит из трех секций. Пазовые части катушек изображены в зависимости от их положения в пазу сплошными или пунктирными линиями, а в лобовых частях эти линии разветвляются: от каждой отходят три отрезка, обозначающих лобовые части трех секций, входящих в катушку. Начала и концы секций соединяют с пластинами коллектора. На схемах на коллекторных пластинах обычно показывают места расположения щеток.

Схемы обмоток якорей, как правило, состоят из ряда повторяющихся одинаковых элементов, поэтому полное представление об обмотке могут дать и сокращенные, так называемые практические схемы. В практических схемах вычерчивают секции только одной из катушек: показывают расположение обеих сторон секции в элементарных и действительных пазах и их соединение с пластинами коллектора. Пластины нумеруют так, чтобы их номера совпадали с номерами элементарных пазов, в которых располагают стороны секций, соединенных с данными пластинами. На рис. 3.51 показана практическая схема обмотки, развернутая схема которой приведена на рис. 3.50.

В большинстве обмоток первый частичный шаг секции y_1 выбирают кратным числу секций в слое паза $u_п$. В этом случае шаги по пазам катушек и всех секций обмотки одинаковые ($y_Z = y_1 / u_п$) и обмотку называют равносекционной (рис. 3.52, а). Если же $y_1 / u_п$ не равно целому числу, то у секций будут разные шаги по пазам якоря

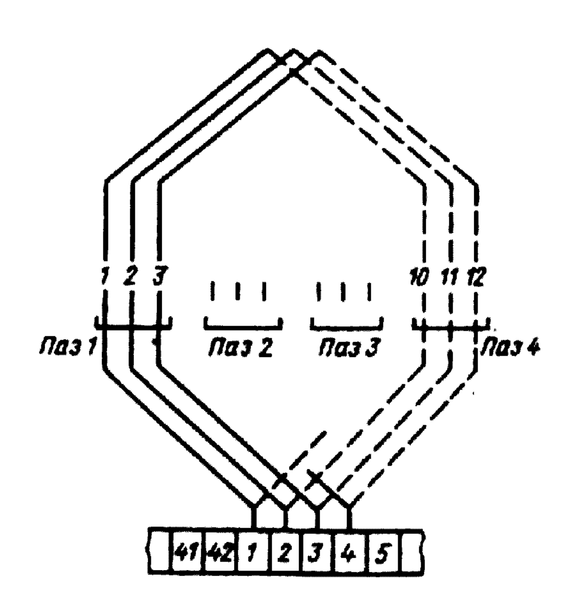
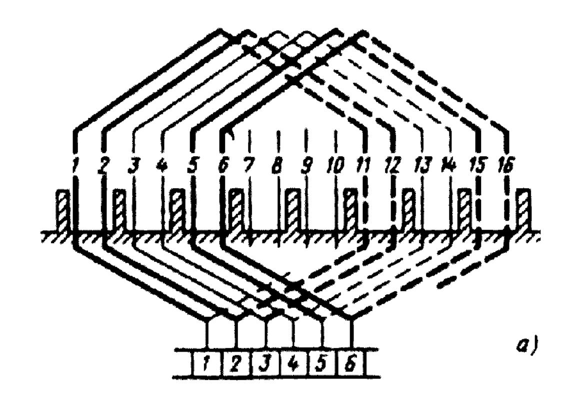


Рис. 3.51. Практическая схема петлевой обмотки, $y_Z = 3$, $u_п = 3$, $y_1 = 9$

(рис. 3.52, б). Такую обмотку нельзя выполнить из целых катушек. Она называется ступенчатой, выполняется только в стержневых обмотках и редко встречается в практике.

Для того чтобы легче понять особенности различных схем обмоток якоря, все последующие схемы в учебнике построены для обмоток с $u_п$ = 1, при этом Z = $Z_э$ = К. Следует отметить, что обмотку якоря с $u_п$ = 1 выполняют крайне редко, так как в этом случае необоснованно увеличивается число пазов и ухудшается их заполнение проводниками, потому что толщина корпусной изоляции катушки, состоящей из одной или из нескольких секций, остается одинаковой.



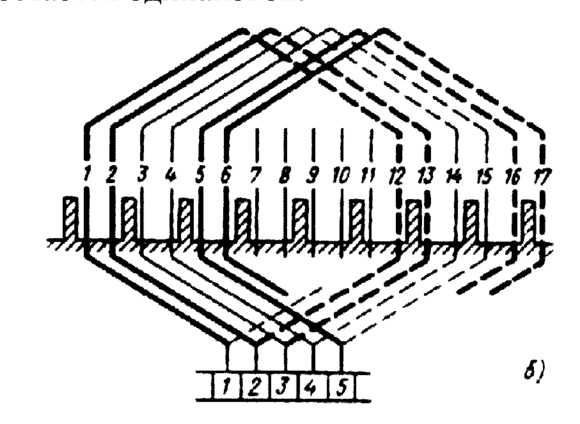


Рис. 3.52. Равносекционная и ступенчатая обмотки:
а) $y_1 = 10$, $u_п$=2, $y_1/y_п$ — равно целому числу (обмотка равносекционная); б) $y_1 = 11$ $u_п$=2, $y_1/y_п$ — не равно целому числу (обмотка ступенчатая)

3.15. ПРОСТЫЕ ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ

В простых петлевых обмотках якоря (см. рис. 3.50) результирующий шаг равен шагу по коллектору:

$$y = y_к = y_1 - y_2 = \pm 1. \qquad (3.26)$$

Большее распространение получили обмотки с у = 1, так как при у = 1 лобовые части секций несколько удлиняются и в них возникает дополнительное перекрещивание выводных концов (см. рис. 3.49, б). Первый частичный шаг петлевой обмотки выбирают близким к полюсному делению:

$$y_1 \; Z_э/2p \pm e, \qquad (3.27)$$

где e — наименьшее число (или дробь), при котором y_1 выражен целым числом, кратным числу $u_п$. Значение е характеризует укорочение (удлинение) шага по сравнению с полюсным делением. Обмотки с укороченным шагом применяются чаще.

Рассмотрим более подробно особенности простых петлевых обмоток на примере схемы, приведенной на рис. 3.50.

На практической схеме этой обмотки (см. рис. 3.51) показано что $y_1 = Z_э / 2p \pm e = 42/4 - 1{,}5 = 9$; $y_2 = y_1 - y = 9 - 1 = 8$. Шаги по пазам всех секций одинаковы: $y_z = y_1 / u_п = 9/3 = 3$. Обмотка равносекционная. Если же выполнить первый частичный шаг $y_1 = 42/4 - 0{,}5 = 10$ ($y_2 = 10 - 1 = 9$), то $y_1/u_п = 10/3$ становится не равным целому числу. Шаги секций по пазам будут разные (рис. 3.52) и обмотка получится ступенчатой.

При простой петлевой обмотке щетки на коллекторе должны быть расположены обязательно через каждое полюсное деление. Замыкая пластины коллектора, они образуют в обмотке 2р параллельных ветвей (рис. 3.53). Поэтому в простой петлевой обмотке число параллельных ветвей всегда равно числу полюсов машины: 2а = 2р.

Параллельные ветви в петлевой обмотке содержат несколько последовательно соединенных между собой секций, в каждой из которых во время работы машины наводится ЭДС. При сборке машины из-за допусков при штамповке и шихтовке сердечника неравномерности воздушного зазора под разными полюсами и ряда других причин всегда существует некоторая асимметрия магнитной цепи. Поэтому ЭДС, наводимые в секциях в разных параллельных ветвях, немного отличаются друг от друга. Сопротивления параллельных ветвей практически всегда различаются между собой из-за различного качества паек мест соединений секций и пластин коллектора. По этим причинам токи в параллельных ветвях петлевой обмотки якоря никогда не бывают абсолютно одинаковые, так как в ветвях обмотки циркулируют уравнительные токи. Они замыкаются через скользящие контакты между щетками и поверхностью коллектора и перегружают их, при этом коммутация машин ухудшается, появляется искрение под щетками, пластины подгорают и коллектор быстрее выходит из строя.

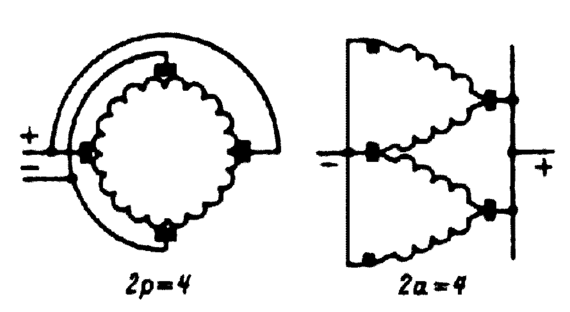


Рис. 3.53. Параллельные ветви простой петлевой обмотки

Чтобы разгрузить щеточные контакты от уравнительных токов, в якорях с петлевой обмоткой устанавливают уравнительные соединения первого рода. Уравнительные сое-

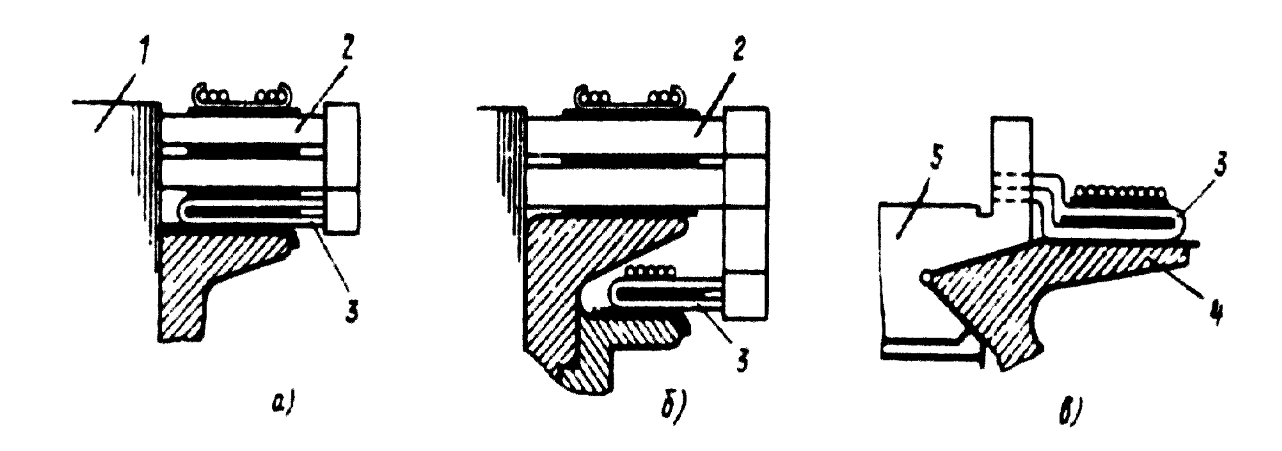


Рис. 3.54. Расположение уравнительных соединений первого рода:
а, б — со стороны, противоположной коллектору; в — со стороны коллектора; 1 — сердечник якоря; 2 — лобовые части обмотки; 3 — уравнительные соединения; 4 — задний нажимной конус коллектора; 5 — коллектор

динения — это изолированные проводники, которые соединяют точки обмотки, имеющие теоретически одинаковые потенциалы. Уравнительные соединения не уменьшают уравнительные токи, а лишь направляют их по безвредному для работы машины пути, обеспечивая нормальную работу щеточного контакта без перегрузки, создаваемой уравнительными токами.

В простой петлевой обмотке одинаковые потенциалы должны быть у всех секций, расположенных на расстоянии двойного полюсного деления друг от друга. Поэтому шаг уравнительных соединений $y_{ур} = К/р$. Наиболее удобные места для подсоединения уравнителей к секциям — это коллекторные пластины или головки лобовых частей секций со стороны, противоположной коллектору (рис. 3.54).

На схеме рис. 3.50 условно показаны только два уравнительных соединения, выполненных с шагом, равным $y_{ур} = К/р = 42/2 = 21$ элементарных пазов.

Уравнительные соединения первого рода выполняют проводниками с площадью поперечного сечения, равной 20...30 % сечения эффективного проводника обмотки. В машинах общего назначения чаще всего устанавливают по два-три уравнительных соединения на каждую пару параллельных ветвей или по одному уравнительному соединению на паз якоря, т. е. в 3 — 4 раза меньше, чем секций в обмотке.

При установке уравнительных соединений (рис. 3.54) усложняется технологический процесс изготовления якоря и увеличивается расход меди, поэтому петлевые обмотки применяют лишь в машинах, в которых не могут быть выполнены простые волновые обмотки [6].

3.16. ПРОСТЫЕ ВОЛНОВЫЕ ОБМОТКИ

Схема простой волновой обмотки якоря приведена на рис. 3.55. Обозначения шагов обмотки показаны на рис. 3.56. Шаг простой волновой обмотки по коллектору равен результирующему шагу:

$$y_к \quad y \quad (K \pm 1)/p.$$

В этой формуле знак «—» предпочтительный, так как при знаке «+» в обмотке появляются дополнительные перекрещивания выводных концов секций. Для первого частичного шага $y_1 = K/2p \pm e$ сохраняется следующее условие: $y_1/u_п$ равно целому числу, иначе обмотка будет ступенчатой. Второй частичный шаг $y_2 = y - y_1$

Секции волновой обмотки соединяют друг с другом последовательно с результирующим шагом, близким к двойному полюсному делению. Поэтому при установке щеток на коллектор обмотка соединяется в две параллельные ветви независимо от числа полюсов

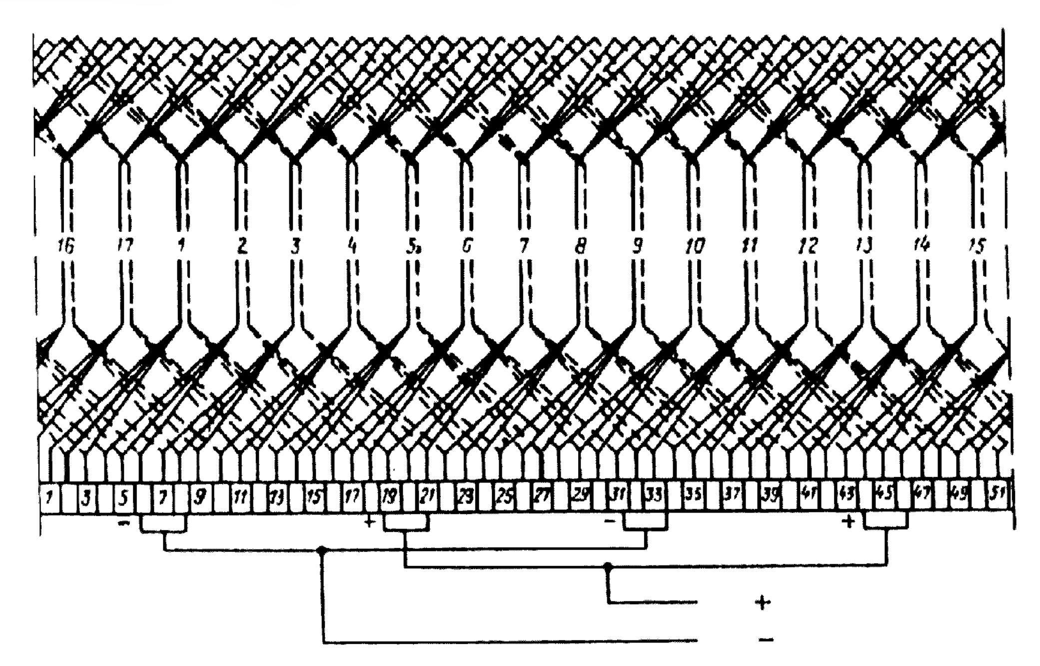


Рис. 3.55. Схема простой волновой обмотки якоря, Z = 17, K = 51, $2p = 4$

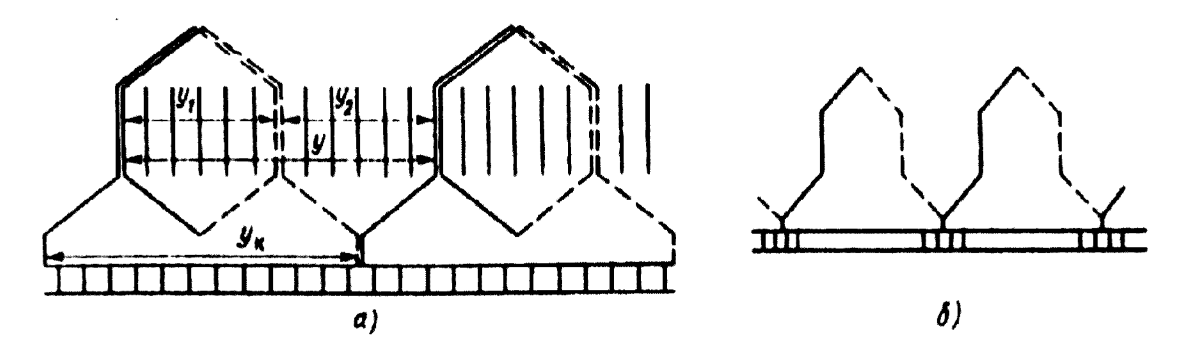


Рис. 3.56. Элементы схемы и обозначение шагов простой волновой обмотки:
а – с двухвитковыми секциями, б – с одновитковыми секциями

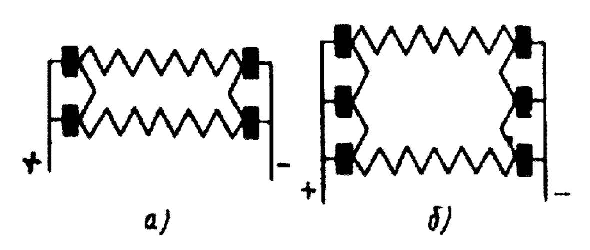


Рис. 3.57. Параллельные ветви в простой волновой обмотке: а) с 2р = 4, б) с 2р = 6

машины. В простых волновых обмотках всегда $2a = 1$ (рис. 3.57). Особенностью обмоток является также возможность работы машины при неполном числе щеточных болтов. Действительно, как видно из рисунка 3.57, уменьшение числа щеточных болтов не приводит к изменению направления токов в параллельных ветвях обмотки.

Это обстоятельство используют, например, в ряде тяговых двигателей постоянного тока, в которых размещение полного числа щеточных болтов, равного 2р, затруднено из-за недостатка места [8].

При $2a = 2$ в обмотке отсутствуют эквипотенциальные точки и установка уравнительных соединений не требуется. Поэтому волновые обмотки более технологичны и дешевы по сравнению с петлевыми. Простые волновые обмотки применяют в большинстве машин, номинальный ток которых не превышает 500...600 А, т. е. ток в каждой параллельной ветви волновой обмотки остается меньшим 250...300 А.

Простые волновые обмотки могут быть выполнены симметричными только при условии, что $y_к = (К \pm 1)/ р$ равно целому числу. Это накладывает определенные ограничения на соотношение чисел К и р. В частности, машины общего назначения мощностью до 200...300 кВт выпускают в большинстве случаев в четырехполюсном исполнении, т. е. с р = 2. Следовательно, для обеспечения симметрии обмотки коллектор якоря должен содержать нечетное число пластин. Но так как $К = Z\, u_п$, то нечетными должны быть также число пазов якоря Z и число секций в катушке $u_п$. В ряде случаев эти условия невыполнимы при заданных линейной нагрузке и уровнях магнитной индукции на участках магнитопровода. В таких якорях при $(К \pm 1)/ р$, не равном целому числу, могут быть выполнены несимметричные волновые обмотки: обмотка с мертвой секцией или искусственно-замкнутая обмотка.

Обмотка с мертвой секцией применяется реже. Для ее выполнения коллектор машины берут с числом пластин, на одну меньшим, чем число секций в обмотке якоря, т. е. с нечетным числом пластин: $К' = Z\, u_п - 1$. Тогда $y_к = (К' \pm 1)/ р$ равно целому числу. По рассчитанному $y_к$ находят частичные шаги y_1 и y_2 и строят волновую обмотку. Число секций в обмотке $s = Z\, u_п$, т. е. на одну больше, чем пластин коллектора. В пазы укладывают все секции, но одну из них не соединяют с коллектором. Образуется «мертвая секция». Выводные концы этой секции подрезают и изолируют; лобовые части закрепляют бандажом вместе со всей обмоткой.

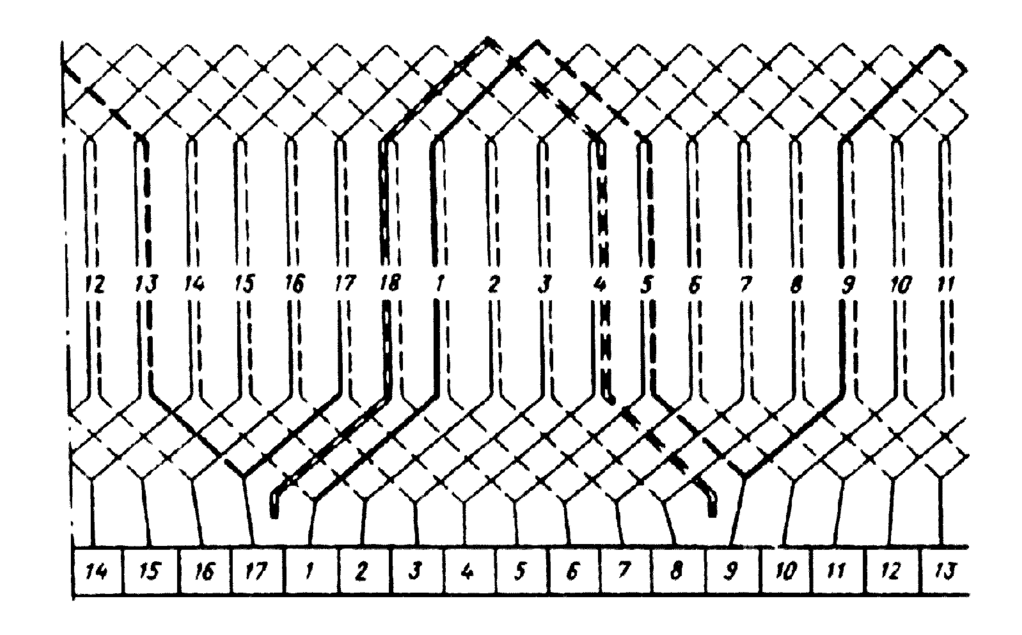


Рис. 3.58. Схема волновой обмотки с мертвой секцией, Z = 18, $u_п$ = 1, K = 17

На рис. 3.58 в качестве примера приведена схема простой волновой обмотки 2р = 4 с мертвой секцией, в которой для упрощения принято Z = 18, $u_п$ = 1. Для построения схемы взято K’ = 18 - 1 = 17; $y_к$ = (17 - 1)/2 = 8; y_1 4. Мертвая секция, не соединенная с пластинами коллектора, выделена на схеме прерывистой жирной линией. Несимметрия схемы проявляется, например, в различных шагах y_2 : шаги по пазам 5 – 9, 6 – 10, 7–11 и т. д. не равны шагам 1 – 6, 2 – 7, 3 – 8 и т. д.

Обмотки с мертвой секцией встречаются в машинах, коллекторы которых имеют большое (K > 100) число коллекторных пластин, при этом возникающая несимметрия, практически незаметна.

Мертвую секцию можно было бы вообще не укладывать в пазы якоря, однако это нарушает последовательность укладки обмотки и требует заполнения оставшихся свободными частей пазов изоляционным материалом и дополнительных мер при балансировке якоря [6].

3.17. СЛОЖНЫЕ ОБМОТКИ ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В машинах с большими номинальными токами при петлевой обмотке якоря токи в каждой из параллельных ветвей могут превосходить допустимые, т. е. быть выше 250...300 А. Для увеличения числа параллельных ветвей обмотку якоря выполняют сложной петлевой. Па рис. 3.59 показан элемент схемы одного из типов сложной обмотки — двухходовой петлевой. Она состоит как бы из двух самостоятельных простых петлевых обмоток (на рис. 3.59 показаны линиями разной толщины). Секции одной из них расположены в нечетных элементарных пазах якоря и соединены с нечетными пластинами коллектора. Секции другой расположены в

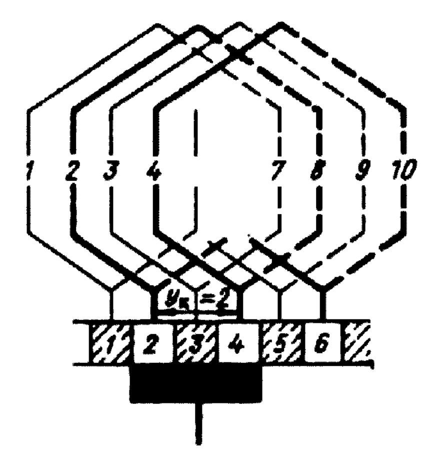


Рис. 3.59. Элемент сложной двухходовой петлевой обмотки

четных элементарных пазах и соединены с четными пластинами коллектора. Шаг обмоток по коллектору $y_к$ = 2. Ширина щеток должна быть такой, чтобы они одновременно замыкали секции обеих обмоток. В каждой из отдельных простых обмоток 2*a* = 2p. При установке щеток на коллектор обе обмотки соединяют параллельно и общее число параллельных ветвей обмотки удваивается. В общем случае, если сложная обмотка состоит из т простых, шаг по коллектору каждой из них будет равен $y_к$ = m, а общее число параллельных ветвей после установки щеток 2*a* = 2pm, где m — число ходов, т. е. число простых обмоток, составляющих сложную.

Если в сложной петлевой обмотке K/m — целое число, то составляющие ее простые обмотки до установки щеток на коллектор электрически не соединены между собой. Каждая из них замыкается сама на себя после обхода по пазам якоря. Такие сложные обмотки называют m-кратнозамкнутыми. При K/m, не равном целому числу, обмотка замыкается только 1 раз после последовательных m обходов всех пазов якоря. Такие обмотки называют однократнозамкнутыми. В сложных петлевых обмотках точки с теоретически равным потенциалом располагаются не только в пределах каждого хода обмотки (в пределах каждой из простых обмоток), но и на разных ходах. Так, например, на элементе схемы двухходовой петлевой обмотки (рис. 3.60, а) одинаковый потенциал должен быть у точки, обозначенной на схеме буквой а, принадлежащей одной из простых

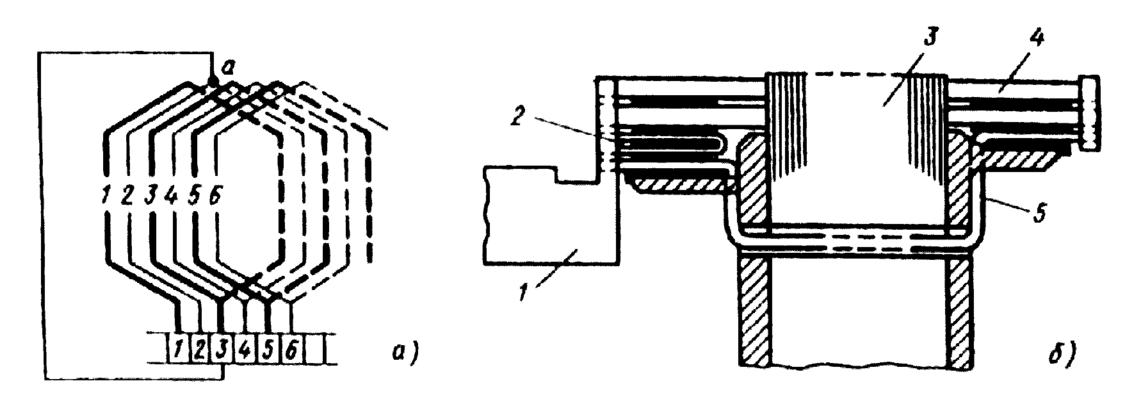


Рис. 3.60. Уравнительные соединения второго рода в двухходовых петлевых обмотках:
а — соединение точек теоретически равного потенциала на схеме обмотки;
б — расположение уравнительных соединений второго рода на якоре машины;
1— коллектор; 2 — уравнительные соединения 1-го рода; 3 — сердечник якоря;
4 — обмотка якоря; 5 — уравнительные соединения 2-го рода

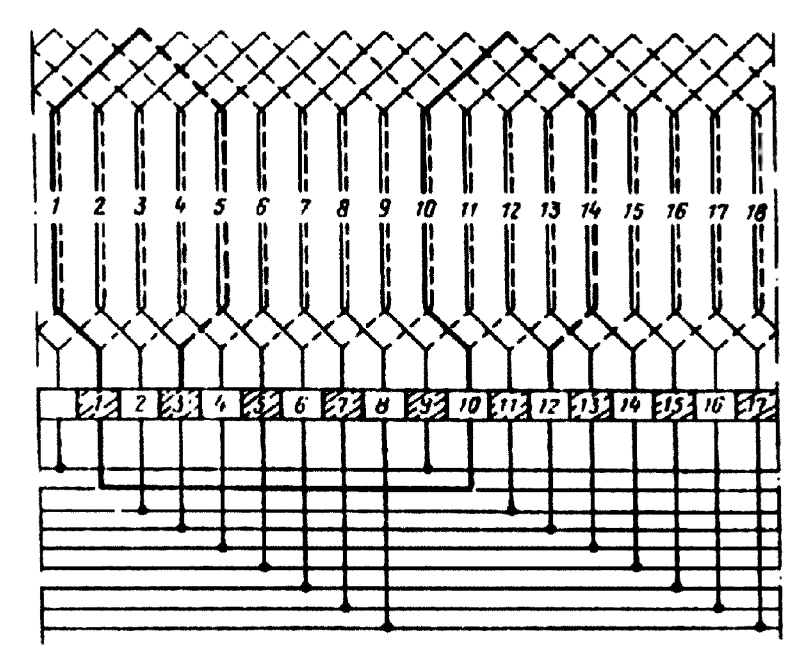


Рис. 3.61. Уравнительные соединения в сложной двухходовой петлевой обмотке ротора при К/р, равном нечетному числу

обмоток, и у вывода секции второй простой обмотки, расположенной в пазу 3, соединенном с пластиной 3. Это объясняется равенством напряжений между пластинами: $U_{к23} = U_{к34}$.

Соединения точек равного потенциала, расположенных на разных ходах (разных простых обмотках, образующих сложную), называют уравнительными соединениями второго рода.

В двукратнозамкнутых двухходовых петлевых обмотках при К/р, равном целому числу, точки теоретически равного потенциала располагаются с разных сторон якоря. В таких машинах уравнительные соединения второго рода необходимо пропускать под магнитопроводом якоря вдоль вала или через втулку (рис. 3.60, б).

При К/р, равном нечетному числу, в двухходовых двукратнозамкнутых петлевых обмотках уравнительные соединения располагаются только с одной стороны якоря (рис. 3.61). На приведенном рисунке две секции, соединенные уравнительными соединениями, выделены жирными линиями.

В машинах специальных исполнений находят применение также и сложные волновые обмотки с $y_к = (К \pm m)/ p$. В них число параллельных ветвей увеличивается в m раз по сравнению с простыми обмотками, т. е. $2a = 2m$. В сложных волновых обмотках, как и в сложных петлевых, необходима установка уравнительных соединений второго рода.

В ряде машин средней мощности для снижения токов в параллельных ветвях и с целью избежать необходимости установки уравнительных соединений применяют комбинированную, так называемую лягушачью обмотку.

Катушка лягушачьей обмотки состоит из секций петлевой и волновой обмоток, соединенных с пластинами одного коллектора. Таким образом, в пазах якоря размещаются как бы две самостоятельные обмотки — волновая и петлевая, соединенные через коллектор параллельно. Числа параллельных ветвей в обеих обмотках должны быть одинаковыми, поэтому волновая обмотка выполняется сложной. Обычно за базу при построении лягушачьей обмотки принимают простую петлевую обмотку, а волновую обмотку выполняют сложной с числом ходов $m_в = p$. В этом случае число параллельных ветвей волновой обмотки становится равным числу параллельных ветвей простой петлевой, т. е. $2a_в = 2a_п = 2p$. Общее число параллельных ветвей лягушачьей обмотки становится в 2 раза больше, чем в петлевой. Достоинством такой обмотки является отсутствие необходимости установки уравнительных соединений. Это объясняется тем, что секции волновой обмотки выполняют роль уравнительных соединений первого рода для петлевой обмотки, а секции петлевой обмотки — роль уравнительных соединений второго рода для сложной волновой [6].

3.18. ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ И КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Конструкция обмоток возбуждения машин постоянного тока определяется мощностью машины, схемой ее возбуждения и назначением обмоток: обмотки главных полюсов машин параллельного и последовательного возбуждения и обмотки дополнительных полюсов.

Обмотки параллельного возбуждения в большинстве машин наматывают из круглого обмоточного провода. Как правило, они имеют много витков (рис. 3.62). В крупных машинах постоянного тока их наматывают из прямоугольного изолированного провода обычно в несколько рядов [9].

Для обмоток последовательного возбуждения и дополнительных полюсов круглый обмоточный провод используют лишь в машинах малой мощности с номинальным током, не превышающим 10...15 А. В машинах с большим номинальным током катушки наматывают из изолированного прямоугольного обмоточного провода, а в машинах большей мощности - из неизолированной шинной меди (рис. 3.63).

В машинах смешанного возбуждения или параллельного со стабилизирующей обмоткой катушки параллельного и последовательного возбуждения устанавливают на главных полюсах друг над другом или делят многовитковую катушку параллельного возбуждения на две части (см. рис. 3.62). Между ними часто располагают катушку последовательного возбуждения (стабилизирующую).

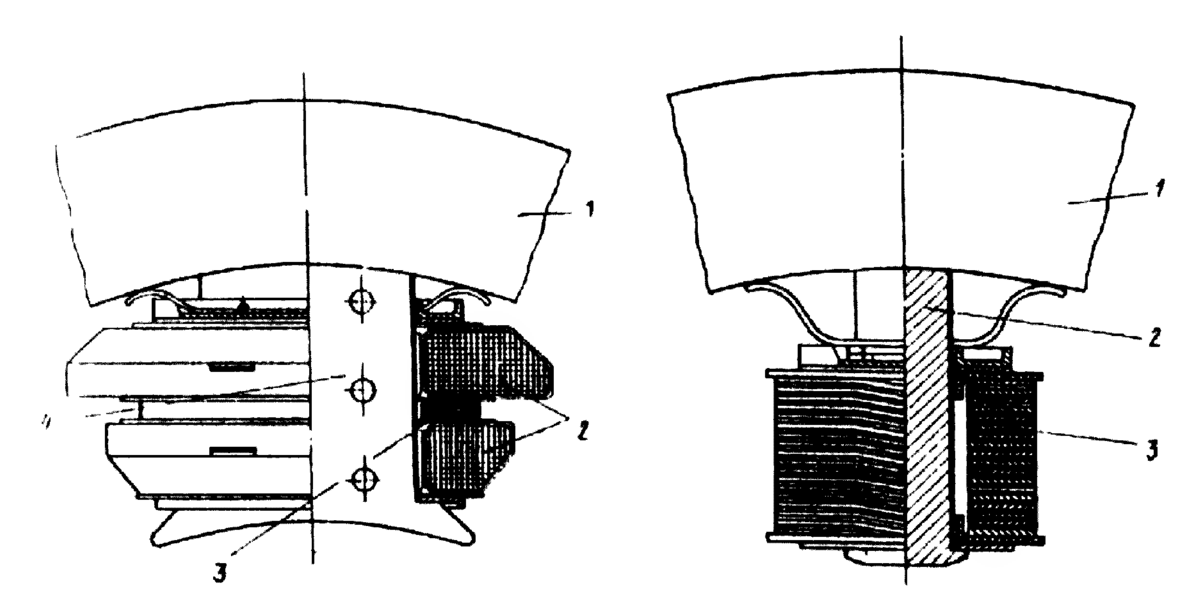


Рис. 3.62. Главный полюс машины постоянного тока с обмотками возбуждения:
1-станина; 2- обмотка параллельного возбуждения; 3- обмотка последовательного возбуждения (стабилизирующая); 4- сердечник полюса

Рис. 3.63. Добавочный полюс машины постоянного тока с обмоткой:
1- станина; 2- сердечник полюса; 3- обмотка добавочного полюса

Компенсационные обмотки в машинах постоянного тока устанавливают для компенсации действия реакции якоря по продольной оси. Обмотка обычно устанавливается только в машинах большой мощности и выполняется из прямоугольного провода. Катушки укладываются в пазы полюсных наконечников так, что одна сторона катушки располагается в пазах наконечника одного полюса, другая — в пазах наконечника другого. Компенсационная обмотка, в большинстве машин однослойная, выполнена из концентрических катушек и соединена последовательно с обмоткой дополнительных полюсов и обмоткой якоря (рис. 3.64).

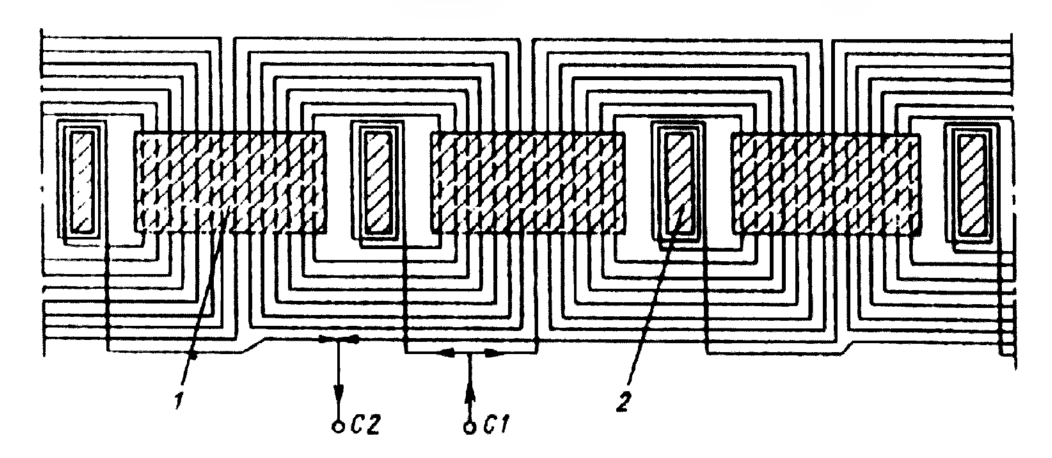


Рис. 3.64. Схема включения компенсационной обмотки машин постоянного тока:
1 – главный полюс; 2 – дополнительный полюс

В последние десятилетия появилась тенденция устанавливать компенсационную обмотку и в машинах средней мощности. Это позволяет уменьшить воздушный зазор машины, что приводит к возможности уменьшения ее габаритов из-за снижения требуемой МДС обмотки возбуждения [6].

3.19. ОБОЗНАЧЕНИЕ ВЫВОДОВ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

ГОСТ 26772—85 устанавливает две различные системы обозначений выводов обмоток машин постоянного тока: для машин, разработанных после введения этого ГОСТ, и для ранее разработанных и модернизируемых машин. Для ранее разработанных и модернизируемых машин постоянного тока сохраняется система обозначений, установленная ГОСТ 183—74 (табл. 3.23), состоящая из букв русского алфавита и цифр.

Таблица 3.23. Обозначения выводов обмоток машин постоянного тока выпуска до 1987 г. и модернизируемых (по ГОСТ 183—74)

Наименование обмотки	Обозначение выводов	
	начало	конец
Обмотка якоря	Я1	Я2
Компенсационная	К1	К2
Обмотка добавочных полюсов	Д1	Д2
Последовательная возбуждения	С1	С2
Независимая возбуждения	Н1	Н2
Параллсльная возбуждения	Ш1	Ш2
Пусковая	П1	П2
Уравнительный провод и уравнительная обмотка	У1	У2
Обмотка особого назначения	01, 03	02, 04

Обозначение начала (цифра 1) и конца (цифра 2) каждой из обмоток должно соответствовать протеканию тока в направлении от начала к концу обмотки при правом вращении машины в двигательном режиме во всех обмотках, кроме размагничивающей на главных полюсах. Если в машине имеется несколько обмоток одного наименования, то их начала и концы после буквенных обозначений (Ш, Н и т. п.) должны иметь цифровые обозначения, стоящие после соответствующих букв, например Ш3-Ш4, Н3-Н4, С5-С6.

Для вновь разрабатываемых машин установлены обозначения выводов, состоящие из букв латинского алфавита и цифр (табл. 3.24) и соответствующие СТ СЭВ 3170-81 и публикации МЭК 34-8 1977 г. В этой системе цифры, стоящие после букв в обозначении нескольких обмоток возбуждения, работающих по одной и той же оси, проставляют в такой последовательности, чтобы при протекании тока от

зажимов с меньшим номером к зажимам с большим номером магнитные поля этих обмоток совпадали по направлению. 1} машинах со взаимосвязанными обмотками добавочных полюсов и компенсационной для обозначения вывода применяется буква С.

Таблица 3.24. **Обозначения выводов обмоток машин постоянного тока, разработанных после 1987 г. (по ГОСТ 26772—85)**

Наименование обмотки	Обозначение выводов	
	начало	конец
Обмотка якоря	A1	A2
Обмотка добавочного полюса	B2	B2
Двухсекционная добавочного полюса (присоединенная к якорю с обеих сторон) с четырьмя выводами	1B1 2B1	1B2 2B2
Компенсационная	C1	C2
Компенсационная, двухсекционная (присоединенная к якорю с обеих сторон) с четырьмя выводами	1C1 2C1	1C2 2C2
Последовательного возбуждения	D1	D2
Параллельного возбуждения	E1	E2
Независимого возбуждения	F1	F2
Независимого возбуждения с четырьмя выводами для последовательного и параллельного включения	F1 F5	F2 F6
Вспомогательная по продольной оси	H1	H2
Вспомогательная по поперечной оси	J1	J2

Обозначения наносят непосредственно на концы обмоток (на кабельные наконечники, шинные зажимы или специальные обжимы, закрепленные на проводах) или на клеммную колодку коробки выводов рядом с выводом обмотки. Навеска на выводные концы обмотки бирок с обозначениями не допускается.

Для обозначения выводов обмоток машин постоянного тока малой мощности, как ранее разработанных, так и вновь разрабатываемых, при диаметре корпуса не более 40 мм и при отсутствии места для буквенно-цифровых обозначений допускается цветовое обозначение проводами с разноцветной изоляцией, краской и т. п.

В ряде машин постоянного тока некоторые обмотки соединяют внутри машины и их соединения не выводят наружу, например конец обмотки якоря и начало обмотки дополнительных полюсов. Соединенные таким образом начала и концы обмоток не обозначают.

Глава четвертая. Магнитная цепь электрической машины

Электромагнитное поле электрической машины образуется МДС обмоток статора и ротора, расположенных в пазах магнитопроводов или на сердечниках явно выраженных полюсов. Неравномерность распределения проводников обмотки по объему машины, нелинейность магнитной характеристики и сложность конфигурации магнитопроводов, а также наличие воздушного промежутка между статором и ротором делают точный расчет поля в машине, практически, невозможным даже при применении современных вычислительных средств. Поэтому при проектировании машины пользуются рядом упрощающих допущений.

4.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Поле в машине подразделяют на главное поле и поле рассеяния. Под главным понимают поле, магнитные линии которого сцеплены с витками как первичной, так и вторичной обмотки. Полем рассеяния называют поле, линии которого сцеплены с витками какой-либо одной из обмоток — статора или ротора (соответственно поле рассеяния статора и поле рассеяния ротора).

Магнитные линии главного поля замыкаются по магнитопроводам статора и ротора и пересекают воздушный зазор. Элементы магнитопроводов и зазоры, по которым проходит главный поток каждой пары полюсов, называют магнитной цепью машины. Расчет магнитной цепи заключается в определении суммарного магнитного напряжения всех ее участков, соответствующего определенному значению потока [6].

В идеальной симметричной машине потоки каждой пары полюсов одинаковы, поэтому при расчете пренебрегают возможной асимметрией потоков реальных машин и рассчитывают магнитную цепь только одной пары полюсов. На поперечном сечении магнитопроводов магнитные линии потока пары полюсов располагаются на секторе, составляющем 1/2p часть всего сечения.

На рис. 4.1, а представлен сектор поперечного сечения машины с распределенными обмотками на статоре и роторе, а на рис. 4.1, б — с явно выраженными полюсами на роторе. На этих рисунках пунктиром показана средняя линия потока пары полюсов.

В целях упрощения расчета магнитная цепь машины подразделяется на ряд последовательно расположенных вдоль силовой линии участков, каждый из

которых имеет сравнительно простую конфигурацию и состоит из материала с определенной магнитной характеристикой. Предполагается также, что на участках известно основное направление магнитных линий потока. Для машин с распределенными обмотками на статоре и роторе, например, асинхронных, такими участками являются (см. рис. 4.1, а) ярмо статора (участок 1—2), зубцовые зоны статора (участки 2—3 и 1—5) и ротора (4—5 и 6—7), воздушный зазор (3—4 и 7—5) и ярмо ротора (5—6). Для машин с явно выраженными полюсами, например синхронных, (см. рис. 4.1, б) — ярмо статора (участок 1—2), зубцовая зона статора (2—3 и 1—12), воздушный зазор (3—4, 11—12), сердечники полюсов (4—6 и 9—11), ярмо ротора (7—8). При наличии демпферной обмотки отдельно учитывают участки, соответствующие ее зубцовой зоне (4—5 и 10—11).

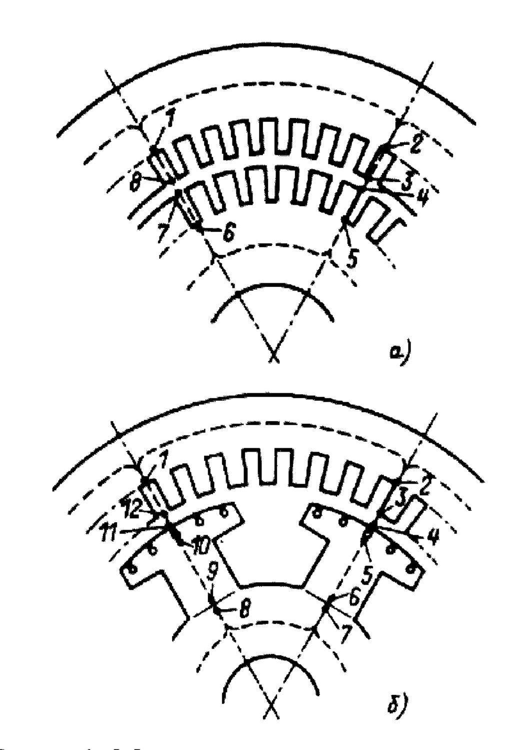


Рис. 4.1. Магнитная цепь электрической машины:
а — с распределенными обмотками; б — с явно выраженными полюсами

При наличии технологических воздушных промежутков в месте соединения полюсов с остовом ротора добавляются участки, соответствующие этим воздушным зазорам (6—7 и 8—9).

Для расчета магнитной цепи используется уравнение полного тока для замкнутой цепи

$$F_{ц} = \oint H dl \qquad (4.1)$$

Интеграл берется по контуру вдоль линии потока. Правая часть равенства в соответствии с подразделением на участки представляется в виде суммы

$$F_{ц} = \sum_{i=1}^{n} H_i l_i$$

где n — число участков, на которые подразделена магнитная цепь; l_i — длина средней магнитной линии в пределах каждого из участков; H_i — расчетное значение напряженности магнитного поля на i-м участке.

Магнитное напряжение на каждом из участков цепи определяют приближенно, принимая напряженность поля в пределах границ участка

неизменной и равной расчетному для данного участка ее значению H_i. Тогда суммарная МДС магнитной цепи

$$F_{ц} = \sum_{i=1}^{n} H_i l_i = \sum_{i=1}^{n} F_i \qquad (4.2)$$

Методы расчета магнитных напряжений различных участков цепи имеют особенности, обусловленные размерными соотношениями, характером распределения потока, необходимостью учета влияния потока рассеяния и другими факторами [6].

Ниже приводятся общие для всех рассматриваемых типов машин методы расчета характерных участков магнитной цепи.

4.2. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

В воздушном зазоре электрической машины индукция непостоянна. При распределенной обмотке она изменяется по кривой, близкой к синусоиде (рис. 4.2, а), а при сосредоточенных обмотках имеет форму, приближающуюся к прямоугольнику (рис. 4.2, б). Значение потока на полюсном делении

$$\Phi = l_\delta \int_0^\tau B_{\delta x}\,dx \qquad (4.3)$$

где l_δ — расчетная длина магнитопровода; $B_{\delta x}$ — индукция в зазоре в точке x.

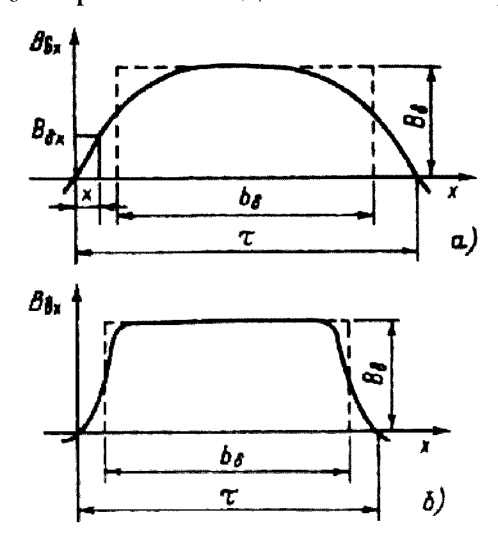


Рис. 4.2. Распределение индукции в воздушном зазоре на полюсном делении электрической машины:
а — с распределенной обмоткой; б — с сосредоточенной обмоткой (с явно выраженными полюсами)

В практических расчетах электрических машин производить интегрирование неудобно, тем более что точное аналитическое выражение распределения индукции вдоль дуги полюсного деления получить трудно. Поэтому вводится понятие расчетной полюсной дуги b_δ, на протяжении которой индукция принимается постоянной. Значение b_δ находится из условия равенства потоков в воздушном зазоре на единицу длины магнитопровода:

$$B_\delta b_\delta = \int_0^\tau B_{\delta x}\,dx \qquad (4.4)$$

где B_δ — максимальное значение индукции в воздушном зазоре.

Величина b_δ определяется как часть полюсного деления машины:

$$b_\delta \quad \alpha_\delta \tau \tag{4.5}$$

где α_δ — коэффициент полюсного перекрытия; его значение, как следует из определения b_δ, зависит от формы кривой поля в воздушном зазоре.

При синусоидальном распределении индукции по длине полюсного деления неявнополюсных машин

$$\alpha_\delta - 2/\pi \approx 0{,}64. \tag{4.6}$$

При насыщении зубцов кривая поля уплощается и значение α_δ возрастает. Для средненасыщенных машин значение α_δ лежит в пределах 0,7 — 0,74, но при больших насыщениях может превышать 0,8.

В машинах с явно выраженными полюсами форма кривой поля зависит от конфигурации, размеров и вида полюсных наконечников, поэтому расчетная длина полюсной дуги b_δ определяется в зависимости от размерных соотношений полюсных наконечников и зазора. Методы расчета b_δ для машин с явно выраженными полюсами приведены в главах книги, в которых рассматривается проектирование машин этих типов.

Картина поля в воздушном зазоре в осевой плоскости (рис. 4.3) показывает, что индукция по длине зазора также неодинакова. Против вентиляционных каналов она будет несколько меньше, чем на участках, лежащих против пакетов сердечника. Кроме того, часть магнитных линий потока замыкается через торцевые поверхности сердечника. Так как в расчетах используется постоянное значение B_δ, то для правильного определения потока через зазор вводится понятие расчетной длины магнитопровода l_δ, при определении которой учитывается неравномерность распределения B_δ вдоль зазора. Расчетная длина может быть найдена аналитическим решением, графическим построением по картине поля или аналогично определению b_δ, т. е. из условия

$$B_\delta l_\delta = \int_{=.\infty}^{+.\infty} B_{\delta z}\, dz \tag{4.7}$$

определяющего равенство площадей прямоугольника длиной l_δ и высотой B_δ и площади криволинейной фигуры, ограниченной действительной кривой распределения индукции вдоль зазора (см. рис. 4.3).

Исследования показали, что доля потока полюсного деления, линии которого замыкаются через торцевые поверхности сердечника, зависит в основном от воздушного зазора. В машинах, имеющих малый зазор, например в асинхронных двигателях, эта часть потока незначительна, и в расчетах ее не учитывают. В машинах с большими зазорами увеличение расчетной длины воздушного зазора по сравнению с действительной за счет этой части потока принимается равным 2δ.

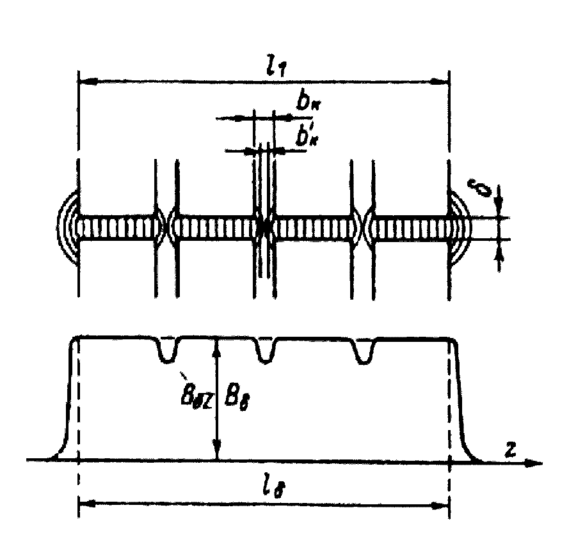


Рис. 4.3. Распределение индукции в воздушном зазоре электрической машины по длине магнитопровода

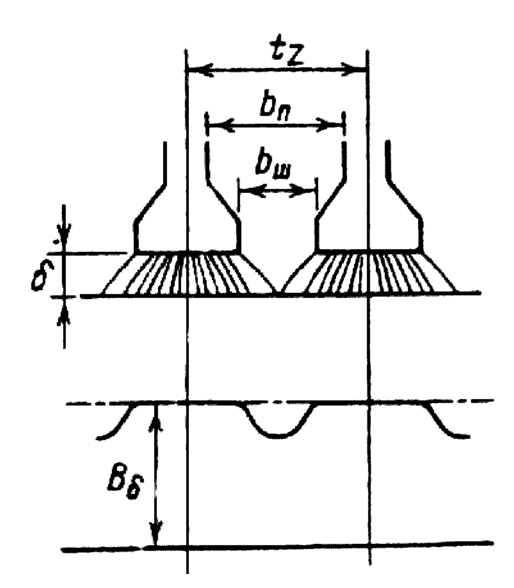


Рис. 4.4. К расчету коэффициента воздушного зазора

Влияние провалов в кривой индукции, возникающих над радиальными вентиляционными каналами, учитывается при определении l_δ следующим образом. Действительная ширина радиальных каналов b_k заменяется расчетной b'_k, которая зависит от соотношения b_k/δ.

Таким образом, расчетная длина магнитопровода в общем случае определяется по формуле

$$l_\delta = l_1 - n_к b'_к + 2\delta \tag{4.8}$$

где l_1 – конструктивная длина магнитопровода; $n_к$ и $b'_к$ – соответственно число и расчетная ширина радиальных вентиляционных каналов.

При наличии каналов только на статоре (или только на роторе)

$$b'_к = \frac{(b_к/\delta)^2}{5 + b_к/\delta} \tag{4.9}$$

При каналах на статоре, и на роторе

$$b'_к = \frac{(b_к/\delta)^2}{2{,}5 + b_к/\delta} \tag{4.10}$$

Радиальные вентиляционные каналы обычно выполняются шириной $b_к$ = 10 мм. В машинах с малым воздушным зазором ($\delta \ll b_к$) расчетная ширина канала $b'_к \approx b_к$.

В машинах с большим воздушным зазором ($\delta \gg b_k$) расчетная ширина канала $b'_к \approx 0$.

С учетом рассмотренных особенностей распределения индукции в воздушном зазоре электрической машины расчетная площадь полюсного деления

$$S_\delta - a_\delta \tau l_\delta \tag{4.11}$$

Тогда индукция в зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi}{S_\delta} = \frac{\Phi}{a_\delta(\tau\ l_\delta)} \tag{4.12}$$

Магнитодвижущая сила воздушного зазора между гладкими поверхностями

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta \tag{4.13}$$

В большинстве машин поверхности статора и ротора, ограничивающие воздушный зазор, не гладкие, а имеют различные неровности: пазы, углубления для размещения бандажей и др. Магнитное сопротивление участков такого зазора в поперечном сечении машины различно, поэтому распределение индукции по площади воздушного зазора неравномерно. Наибольшая неравномерность возникает из-за наличия зубцов на статоре и роторе. Над коронками зубцов магнитные линии сгущаются, а над прорезями пазов плотность линии уменьшается (рис. 4.4). В кривой индукции в воздушном зазоре появляются провалы. Магнитное сопротивление и магнитное напряжение воздушного зазора при неравномерной индукции возрастают.

Увеличение магнитного напряжения учитывается введением коэффициента воздушного зазора (коэффициента Картера) k_δ. Этот коэффициент, полученный расчетом полей в зазорах с различным соотношением ширины зубцов и пазов, показывает, насколько возрастает магнитное напряжение зазора при зубчатой поверхности статора или ротора по сравнению с магнитным напряжением зазора между гладкими поверхностями.

Можно использовать также понятие расчетного воздушного зазора

$$\delta' \quad \delta k_\delta \tag{4.13 а}$$

т. е. равномерного воздушного зазора, который имеет магнитную проводимость, равную магнитной проводимости реального воздушного зазора. С учетом k_δ МДС зазора

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta . \tag{4.14}$$

Если одна поверхность зазора гладкая, а другая зубчатая, то k_δ достаточно точно определяется по формуле

$$k_\delta \quad t_Z / (t_Z - \gamma\delta), \tag{4.15}$$

где

$$\gamma = \frac{(b_ш / \delta)^2}{5 + b_ш / \delta}$$

либо по формуле

$$k_\delta = \frac{t_Z + 10\delta}{t_Z - b_ш + 10\delta} \tag{4.16}$$

Обозначения величин, входящих в формулы, ясны из рис. 4.4.

Формула (4.15) получила наибольшее распространение. Формула (4.16) используется, в основном, при открытых пазах.

Коэффициенты воздушного зазора рассчитывают отдельно для статора и для ротора. В первом случае предполагается, что поверхность статора зубчатая, а ротора — гладкая, во втором — наоборот: поверхность ротора зубчатая, а статора гладкая.

В расчетные формулы (4.14) — (4.16) подставляются значения t_Z и $b_ш$, характеризующие зубцы, влияние которых учитывается коэффициентами $k_{\delta1}$ и $k_{\delta2}$. Так, для машины, имеющей зубцы и на статоре, и на роторе, рассчитывают:

для статора

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш1} / \delta)^2}{5 + b_{ш1} / \delta}\ ; \quad k_{\delta1} = \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - \gamma_1\delta} \tag{4.17}$$

для ротора

$$\gamma_2 = \frac{(b_{ш2} / \delta)^2}{5 + b_{ш2} / \delta}\ ; \quad k_{\delta2} = \frac{t_{Z2}}{t_{Z2} - \gamma_2\delta} \tag{4.18}$$

где t_{Z1}, $b_{ш1}$ и t_{Z2} и $b_{ш2}$ — соответственно зубцовые деления и ширина шлица пазов статора и ротора.

По аналогичным формулам находят и другие частичные коэффициенты воздушного зазора $k_{\delta3}$, $k_{\delta4}$,..., учитывающие влияние других неравномерностей воздушного зазора, например канавок для размещения бандажей на якорях машин постоянного тока.

Результирующий коэффициент воздушного зазора равен произведению всех частичных коэффициентов, рассчитанных для статора и ротора:

$$k_\delta - k_{\delta1}\, k_{\delta2}\, k_{\delta3} \ldots \tag{4.19}$$

Таким образом, МДС воздушного зазора электрической машины F_δ, А, определяется по формуле

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta\, \delta\, k_\delta\ , \tag{4.20}$$

где k_δ — коэффициент воздушного зазора; B_δ — индукция в воздушном зазоре, Тл:

$$B_\delta \quad \Phi/(\,a_\delta\,\tau\,l_\delta\,),$$

α_δ — коэффициент полюсного перекрытия; l_δ — расчетная длина магнитопровода [6].

4.3. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ЗУБЦОВЫХ ЗОН

При расчете магнитных напряжений зубцовых зон принимается попущение, что линии равного магнитного потенциала в поперечном сечении машины представляют собой окружности с центром на оси вращения ротора. При этом допущении магнитное напряжение зубцовой зоны статора F_{Z1} или ротора F_{Z2} определяется разностью магнитных потенциалов между эквипотенциальными поверхностями (на поперечном сечении — окружностями), проходящими по дну пазов и по поверхности головок зубцов.

Обычно рассматривают поле в одном элементе зубцовой зоны — зубцовом (пазовом) делении $t_Z = \pi D/\ Z$. Магнитные сопротивления паза и зубца в магнитной цепи машины соединены параллельно, поэтому поток в зубцовом делении распределяется между ними пропорционально проводимостям магнитных силовых трубок, проходящих через зубец и паз. Пазы в электрической машине заполнены проводниками и их изоляцией, т. е. средой с магнитной проницаемостью, во много раз меньшей, чем проницаемость стали зубца. Поэтому поток в пазу составляет лишь небольшую часть общего потока зубцового деления. Эта часть потока как бы «вытесняется» из зубца в паз. При малом насыщении зубцов она очень мала и в расчетах ее не учитывают. При увеличении насыщения зубцов доля потока в пазу возрастает и ее влияние начинает сказываться на магнитном напряжении зубцовой зоны F_Z.

Рассмотрим вначале расчет магнитного напряжения зубцовой зоны без учета вытеснения части потока в паз. При принятом допущении о конфигурации эквипотенциальных линий и в силу симметрии зубцовой зоны магнитные силовые линии, проходящие через середины оснований зубцов, совпадают с отрезками радиусов (см. рис. 4.1, а и б), поэтому

$$F_z = \int_0^{h_z} H_{Zx}\,dx \qquad (4.21)$$

где H_{Zx} — напряженность магнитного поля в сечении зубца, соответствующем расстоянию h_{Zx} от его узкой части; h_Z — высота зубца (рис. 4.5, а).

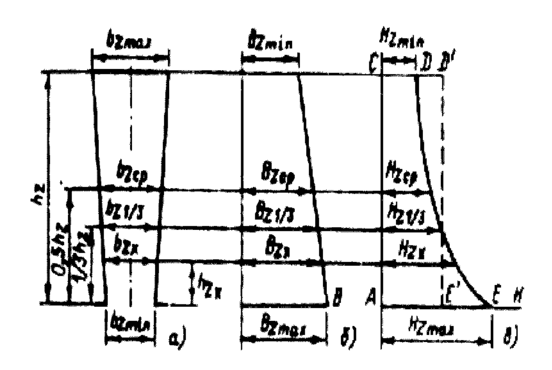


Рис. 4.5. К расчету магнитного напряжения зубцовой зоны

При постоянном сечении зубца считают, что напряженность поля в нем H_Z постоянна, тогда

$F_Z \quad H_Z h_Z$ (4.21 а)

При переменном сечении зубца F_Z можно определить, разделив зубец по высоте на n достаточно малых участков с высотой Δh, в пределах которых изменением H_Z пренебрегают.

Определив для каждого участка индукцию, напряженность магнитного поля, магнитное напряжение и просуммировав последние, находят магнитное напряжение зубца.

Поток, приходящийся на одно зубцовое деление,

$$\Phi_{tZ} \quad B_\delta \, t_Z \, l_\delta. \tag{4.22}$$

Если через b_{Zx} обозначить ширину зубца на высоте h_{Zx}, то соответствующее активное сечение зубца

$$S_{Zx} \quad k_c \, l_{ст} \, b_{Zx},$$

где k_c — коэффициент заполнения сердечника сталью; $l_{ст}$ — длина магнитопровода без вентиляционных каналов.

Индукция в рассматриваемом сечении зубца (рис. 4.5, б)

$$B_{Zx} = \frac{\Phi_t z}{S_{Zx}} = \frac{B_\delta t_Z l_\delta}{k_C l_{CT} b_{Zx}} \tag{4.23}$$

Напряженность поля определяется для соответствующей индукции по кривым намагничивания для выбранной марки стали.

Проведя несколько таких расчетов для различных сечений зубца, можно для потока Φ_{tZ} построить кривую распределения напряженности поля по высоте зубца (рис. 4.5, в). Площадь, ограниченная этой кривой, S_{ACDE} определяется в масштабе магнитного напряжения зубца:

$$F_Z = \int_0^{h_Z} H_x \, dx$$

Зубцы в электрических машинах могут иметь сложную конфигурацию, поэтому такие расчеты выполняют лишь на ЭВМ при необходимости получения уточненных данных, при этом программы расчетов должны учитывать особенности размерных соотношений данной зубцовой зоны.

В практических расчетах оказывается достаточным приближенное решение, когда F_Z находится по (4.21) для некоторой средней расчетной

напряженности H_Z и расчетной высоты зубца h_Z, для которых справедливо

$$\int_0^{h_z} H_x dx = H_Z h_Z = F_Z$$

При плавно изменяющихся сечениях зубцов расчетная напряженность H_Z достаточно точно находится по формуле

$$H_Z = \frac{1}{6}(H_{Zmax} + 4H_{Zср} + H_{Zmin}). \qquad (4.24)$$

Здесь $H_{Z\max}$, $H_{Z\min}$ и $H_{Zср}$ — напряженности поля в поперечных сечениях зубца, которые определяются по индукциям в наиболее узком $S_{Z\min}$, наиболее широком $S_{Z\max}$ и среднем по высоте $S_{Zср}$ сечениях зубца, по следующим формулам:

$$B_{Z\max} = \frac{\Phi_{tZ}}{S_{Z\min}} = B_\delta \frac{t_Z l_\delta}{b_{Z\min} l_{ст} k_C};$$

$$B_{Z\min} = \frac{\Phi_{tZ}}{S_{Z\max}} = B_{Z\max} \frac{b_{Z\min}}{b_{Z\max}}; \qquad (4.25)$$

$$B_{Zср} = \frac{\Phi_{tZ}}{S_{Zср}} = \frac{B_{Z\max} + B_{Z\min}}{2};$$

где $b_{Z\min}$, $b_{Z\max}$ - наибольшая и наименьшая ширина зубца (см. рис. 4.5, б)

При прямоугольных пазах при $B_{Z\max} \leq 2{,}0$ Тл используется распространенный метод расчета F_Z по напряженности $H_{Z1/3}$, определенной по индукции в сечении на 1/3 высоты зубца от его узкой части (см. рис. 4.5):

$$F_Z = H_{Z1/3} h_Z, \qquad (4.26)$$

дающий хорошее совпадение с уточненными расчетами при небольшой разнице наибольшего и наименьшего сечений зубцов. При этом площадь прямоугольника ACD'E' со сторонами $H_{Z1/3}$ и h_Z равновелика площади фигуры ACDE (см. рис. 4.5, в).

В отдельных случаях при большей разнице $b_{Z\max}$ и $b_{Z\min}$ и больших насыщениях расчет проводится более детально. Зубец делится по высоте на две части, и для каждой из них определяется средняя напряженность поля указанным методом. В этом случае расчетные сечения берутся на высоте

$$\frac{1}{3}\frac{h_Z}{2} \approx 0{,}2\, h_Z \quad \text{и} \quad \frac{1}{3}\frac{h_Z}{2} + \frac{h_Z}{2} = \frac{2}{3} h_Z \approx 0{,}7\, h_Z$$

от наиболее узкого сечения зубца.

При расчете магнитного напряжения зубцов с резко изменяющимся по высоте сечением, например зубцов двухклеточного ротора асинхронного двигателя и короткозамкнутого ротора с фигурными пазами, зубцы также делятся по высоте на два участка с плавно изменяющимся сечением, при том магнитное напряжение зубцов равно сумме магнитных напряжений участков.

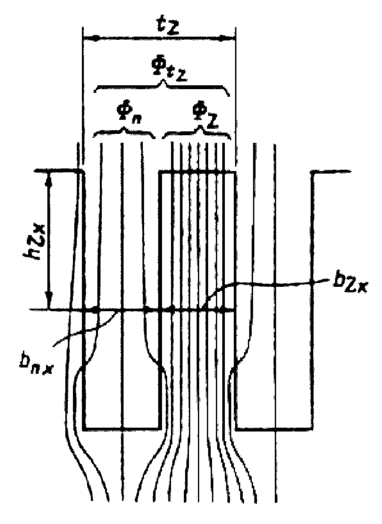


Рис. 4.6. Магнитный поток в зубцовом делении при насыщении стали зубцов

Влияние местных изменений сечения зубца на изменение магнитного напряжения, не распространяющихся на большие, участки по его высоте (углубления в стенках пазов для крепления пазовых клиньев, расширения в коронках зубцов и т. п.), в практических расчетах обычно не учитывают.

В насыщенной зубцовой зоне доля потока в пазу возрастает. Ее можно оценить, не прибегая к полному расчету поля на зубцовом делении, следующим образом.

Обозначим поток в зубце Φ_Z и поток в пазу $\Phi_п$ (рис. 4.6), тогда поток на зубцовом делении на высоте зубца h_{Zx} будет равен:

$$\Phi_{tZ} = \Phi_{Zx} + \Phi_{пx} \tag{4.27}$$

Разделив (4.27) на S_{Zx} и умножив и разделив второе слагаемое правой части на $S_{пx} = b_{пx}\, l_\delta$, получим

$$\frac{\Phi_{tZ}}{S_{Zx}} = \frac{\Phi_{Zx}}{S_{Zx}} + \frac{\Phi_{пx}}{S_{Zx}}\frac{S_{пx}}{S_{пx}} \tag{4.28}$$

или

$$B'_{Zx} = B_{Zx} + B_{пx}\frac{S_{пx}}{S_{Zx}} \tag{4.29}$$

где B'_{Zx} — расчетная индукция, определимая полным потоком в сечении зубца S_{Zx} в предположении, что поток в пазу отсутствует; b_{Zx} — действительная индукция в сечении зубца S_{Zx}, т.е. индукция, определенная с учетом того, что часть потока вытесняется из зубца в паз; $B_{пx}$ — индукция в сечении паза $S_{пx}$, создаваемая вытесненной в паз частью потока.

Так как паз заполнен средой с магнитной проницаемостью μ_0 (магнитной постоянной), то

$$B_{пx} = \mu_0\, H_{пx}. \tag{4.30}$$

На основании принятого допущения о конфигурации эквипотенциальных линий в зубцовой зоне напряженность поля в зубце и в пазу на одной и той же высоте h_{Zx} будет одинакова, т. е.

$$H_{пx} = H_{Zx}.$$

Тогда из (4.29) и (4.30) имеем

$$B'_{Zx} = B_{Zx} + \mu_0\, H_{Zx}\,\frac{S_{пx}}{S_{Zx}} \tag{4.31}$$

или

$$B'_{Zx} - B_{Zx} + \mu_0 H_{Zx} k_{пx}, \qquad (4.32)$$

где $k_{пx}$ — коэффициент, определяющий отношение площадей поперечных сечений паза и зубца на высоте h_{Zx}:

$$k_{пx} = \frac{S_{пx}}{S_{Zx}} = \frac{b_{пx} l_\delta}{b_{Zx} l_{ст} k_C} \qquad (4.33)$$

В машинах нормального исполнения $k_п$ для различных по высоте зубца сечений обычно находится в пределах $k_п = 0,5 – 2,0$.

Для определения действительной индукции в каждом сечении зубца первоначально находят расчетную индукцию по полному потоку зубцового деления:

$$B'_{Zx} = \frac{\Phi_t}{S_{Zx}} = \frac{B_\delta l_\delta t}{k_c l_{ст} b_{Zx}} \qquad (4.34)$$

После этого, задаваясь значениями b_{Zx}, несколько меньшими, чем B'_{Zx}, подбором находят действительную индукцию B_{Zx} и соответствующее ей значение H_{Zx}, при которых удовлетворяется равенство (4.32). Для облегчения расчета в приложении 2 приведены кривые, позволяющие определить h_{Zx} непосредственно по расчетной индукции b'_{Zx} с учетом фиксированных значений коэффициента $k_п$.

Численные значения $k_п$ и $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м в (4.32) позволяют судить о значениях индукции в зубцах, при которых необходимо учитывать ответвление потока в паз. Для большинства современных электротехнических сталей при индукции $B_Z \leq 1,8$ Тл напряженность поля не превышает $H \leq 16000$ А/м, следовательно, при этом уровне насыщения действительная индукция в зубцах будет меньше, чем расчетная, лишь на 2—3 % даже при больших значениях $k_п$, поэтому в расчетах этим изменением можно пренебречь.

При индукциях $B_Z \geq 1,8$ Тл расчет следует проводить с учетом ответвления потока в паз. Естественно, что вопрос о необходимости такого учета решается при определении индукции в каждом из расчетных сечений зубца в отдельности [6].

4.4. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ЯРМ СТАТОРА И РОТОРА

Распределение потока в ярмах статора и ротора зависит от конструкции машины, размерных соотношений магнитопроводов и уровня насыщения стали. Значение потока в различных сечениях вдоль средней линии ярма непостоянно. При распределенной обмотке, например, в асинхронных машинах, наибольший поток в ярмах статора и ротора имеет место в сечении 1—1 (рис. 4.7), так как на этом участке ярма потоки зубцов, находящихся на

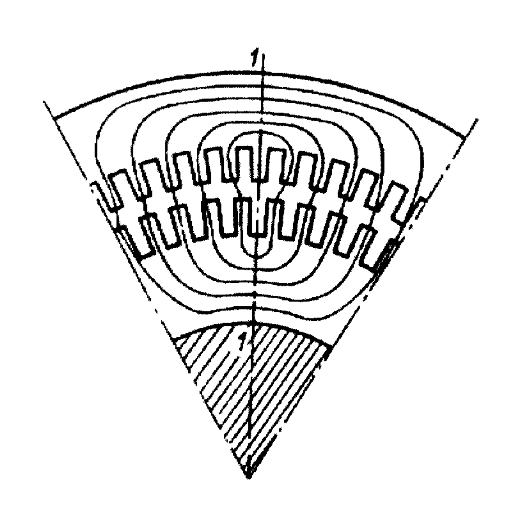


Рис. 4.7. Магнитные силовые линии потока в магнитопроводе электрической машины с распределенной обмоткой

половине полюсного деления, суммируются. То же происходит в статорах синхронных машин нормального исполнения и якорях машин постоянного тока.

В станинах машин постоянного тока и ярмах явнополюсных роторов синхронных машин поток по длине средней линии меняется мало и его изменением пренебрегают.

Распределение потока по высоте ярма также неравномерно из-за кривизны ярма и некоторого изменения его сечения в местах примыкания полюсов и под основаниями зубцов. Ближе к оси машины индукция в ярме больше, чем на периферии. Неравномерность индукции возрастает с увеличением насыщения стали и уменьшением диаметра магнитопровода.

Для точного учета влияния этих факторов необходимы трудоемкие расчеты поля с помощью ЭВМ.

В практических расчетах обычно пренебрегают кривизной магнитопровода, т. е. рассматривают поперечное сечение ярма как прямоугольник с длиной, равной длине средней магнитной силовой линии потока в ярме.

Неравномерность распределения потока по сечению ярм учитывают, либо пользуясь для расчетов специальными кривыми намагничивания, построенными для сталей ярм машин с распределенной обмоткой, либо введением в расчетные формулы коэффициента ξ [6].

Расчет проводят по индукции в среднем сечении ярма. Расчетные формулы для определения МДС ярм зависят от особенностей конструкции машин и даны в главах учебника, посвященных проектированию машин различных типов. Там же приводятся методы учета ответвления потока ярма ротора в вал машины при посадке сердечника ротора непосредственно на вал без втулки.

4.5. МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И КОЭФФИЦИЕНТ РАССЕЯНИЯ ПОЛЮСОВ

Магнитные силовые линии потока в явно выраженных полюсах показаны на рис. 4.8. Как видно, независимо от того, расположены полюса на статоре (на станине в машинах постоянного тока) или на роторе (в синхронных машинах), поток в полюсе состоит из двух

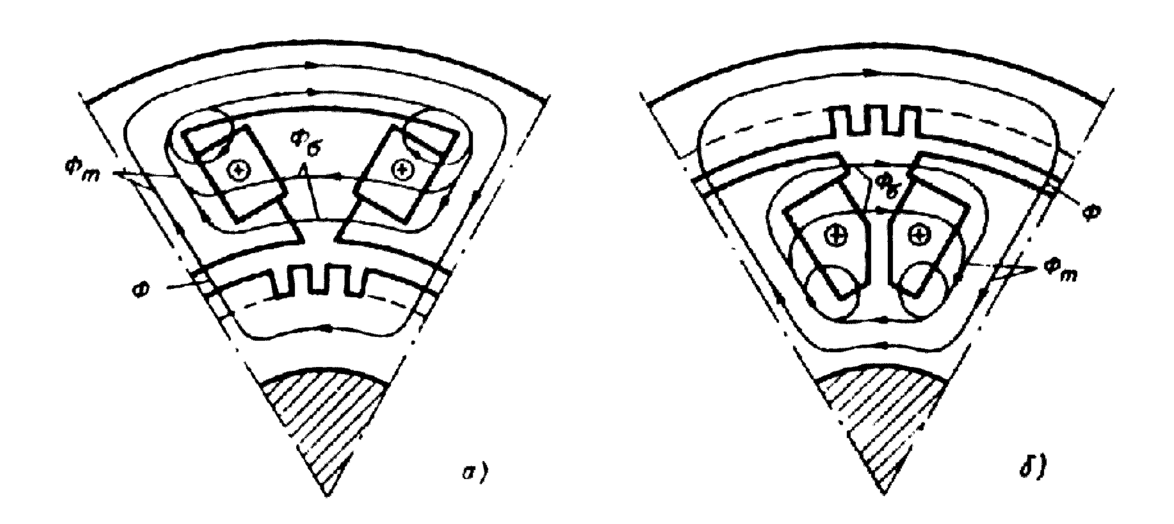


Рис. 4.8. Магнитные силовые линии в магнитопроводе электрической машины с явно выраженными полюсами:
а — на статоре; б — на роторе

частей. Одна из них поступает в воздушный зазор и формирует поле машины, передающее электромагнитную мощность. Эта часть является рабочим потоком Ф. Другая часть сцеплена только с витками обмотки возбуждения и косвенно участвует в создании электромагнитного момента. Эту часть потока называют потоком рассеяния и обозначают Φ_σ.

Суммарный поток в полюсе

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma. \tag{4.35}$$

Поток Φ_m, строго говоря, непостоянен по высоте сердечника полюса, так как магнитные силовые линии потока рассеяния ответвляются в межполюсное окно по всей высоте поверхности сердечника полюсов. Наибольшая величина Φ_m будет в основании полюса, а наименьшая в полюсном наконечнике (рис. 4.8).

Поток рассеяния по высоте межполюсного окна определяется МДС обмотки возбуждения, сцепленной с каждой частью потока рассеяния, и проводимостью этой части потока в межполюсном окне (магнитным сопротивлением стали для потока рассеяния можно пренебречь, так как магнитное сопротивление воздушного промежутка значительно больше сопротивления стали).

Из рис. 4.8 видно, что магнитные силовые линии потока, выходящие из торцов полюсных наконечников, имеют по сравнению с другими наименьшую длину пути по воздуху, поэтому проводимость этой части потока рассеяния будет наибольшей. Кроме того, поток между полюсными наконечниками создается полной МДС всей обмотки полюса, поэтому поток рассеяния через кромки полюсных наконечников, в основном, определяет весь поток рассеяния полюсов.

Через боковые поверхности полюсов ответвляется значительно, меньшая часть потока Φ_σ. Это позволяет в практических расчетах принять допущение о постоянстве потока Φ_m по всей высоте полюса. Поток Φ_m по отношению к потоку Ф при первоначальных расчетах оценивается приближенно коэффициентом рассеяния полюсов σ_m

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi(1 + \Phi_\sigma / \Phi) = \sigma_m \Phi. \tag{4.36}$$

Значение σ_m, обычно лежит в пределах 1,2—2,5 в зависимости типа и исполнения машины.

При принятом допущении о постоянстве потока Φ_m расчетная индукция в сердечнике полюса

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_m} = \sigma_m \frac{\Phi}{k_C b_m l_m}, \tag{4.37}$$

где S_m — сечение сердечника полюса, м^2; $k_с$ — коэффициент заполнения сердечника полюса сталью; b_m и l_m — ширина и длина сердечника полюса, м.

МДС на один полюс рассчитывается по H_m, найденной для соответствующей марки стали по индукции Вт:

$$F_m = H_m h_m, \tag{4.38}$$

где h_m — высота полюса с полюсным наконечником, м.

Расчет F_m, основанный на приближенном значении σ_m, проводят лишь при предварительном определении размеров полюса. При расчете параметров и характеристик машины необходимо более точное определение Φ_σ.

Поток рассеяния Φ_σ зависит от размеров полюсов, межполюсного окна и магнитных характеристик элементов магнитной цепи машины. На рис. 4.9 приведена упрощенная схема замещения магнитной цепи явнополюсной синхронной машины. Для машин постоянного тока последующие выводы остаются такими же. Основной поток Ф и поток рассеяния Φ_σ создаются одной и той же МДС обмотки возбуждения $F_В$. Магнитные сопротивления путей этих потоков включены параллельно. Сопротивление потоку Ф определяется магнитными характеристиками воздушного зазора, зубцовых зон и ярма статора. Суммарное магнитное сопротивление этих участков (см. рис. 4.9) обозначено R_μ. Сопротивление для потока Φ_σ, определяемое, в основном, магнитной характеристикой межполюсного пространства, обозначено R_σ. Магнитные сопротивления стали полюсов и ярма ротора, общие для обоих потоков, на схеме не показаны.

Проводимость $\Lambda_\mu = 1/R_\mu$ нелинейно изменяется в зависимости от насыщения стальных участков; проводимость $\Lambda_\mu = l/ R_\sigma$ для данных

размерных соотношений полюсов постоянна и определяется размерами межполюсного пространства и полюсных наконечников.

Распределение потоков Ф и $Ф_σ$ по параллельным ветвям пропорционально магнитным проводимостям ветвей т. е.

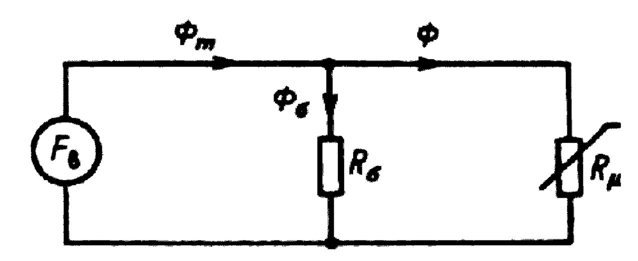


Рис. 4.9. Упрощенная схема замещения магнитной цепи явнополюсной синхронной машины

$$Ф_σ/Ф = Λ_σ/Λ_μ.$$

Откуда

$$Ф_σ = Ф\frac{Λ_σ}{Λ_μ} \qquad (4.39)$$

Так как $Λ_μ$ — магнитная проводимость зубцовой зоны, воздушного зазора и спинки статора, то справедливо выражение

$$Ф = Λ_μ F_{δ Z a}, \qquad (4.40)$$

где $F_{δ Z a}$ — суммарная МДС этих участков:

$$F_{δ Z a} = F_δ + F_Z + F_a. \qquad (4.41)$$

Из (4.39) и (4.40) получим

$$Ф_σ = Λ_σ F_{δ Z a} \qquad (4.42)$$

Выражение (4.42) показывает, что величина потока $Ф_σ$ зависит как от проводимости межполюсного окна $Λ_σ$ так и от МДС и возрастает с увеличением насыщения магнитной цепи машины.

Следует отметить, что в суммарную МДС $F_{δ Z a}$ должна быть также включена МДС зубцовой зоны демпферной (пусковой) обмотки, а в машинах постоянного тока — компенсационной обмотки, так как она создает магнитное сопротивление только потоку Ф.

Расчет МДС $F_δ$, F_Z и F_a рассмотрен в предыдущих параграфах. Расчет $Λ_σ$ связан с особенностями и размерными соотношениями явновыраженных полюсов и рассмотрен в главах, относящихся к проектированию синхронных машин и машин постоянного тока.

4.6. ХАРАКТЕРИСТИКА ХОЛОСТОГО ХОДА

При расчете электрической машины необходимо определить характеристику холостого хода, т. е. зависимость ЭДС в ее обмотках от МДС или от тока обмотки возбуждения: $E = f(F_в)$. Так как МДС обмотки возбуждения соответствует напряжению магнитной цепи машины $F_ц$, а ЭДС обмотки якоря при постоянной частоте вращения пропорциональна потоку

Ф, то характеристика холостого хода при этом условии эквивалентна зависимости $Ф = f(F_ц)$, которую называют магнитной характеристикой машины [6].

Напряжение магнитной цепи $F_ц$ представляет собой сумму МДС всех ее участков, расчет которых рассмотрен в предыдущих параграфах.

Участки в магнитной цепи машины соединены последовательно, а магнитные напряжения каждого из них зависят от потока в участке. Поэтому при расчете $F_ц$ берут сумму магнитных напряжений участков, определенных для одного и того же потока. Естественно, что при расчете магнитных напряжений ряда участков в явнолюсных машинах должны быть приняты во внимание потоки рассеяния полюсов этих машин.

Если МДС цепи генератора определить для потока, при котором его ЭДС на холостом ходу при номинальной частоте вращения будет равна номинальному напряжению, то полученное значение $F_ц$ определит МДС возбуждения $F_{в0}$, необходимую для обеспечения такого режима. $F_{в0}$ называют МДС возбуждения холостого хода, а ток возбуждения, создающий $F_{в0}$, — током возбуждения холостого хода и обозначают $I_{в0}$.

Для характеристики работы генератора на холостом ходу необходимо знать, как изменяется напряжение на его выводах при изменении тока возбуждения. Для этого рассчитывают $F_ц$ при нескольких различных значениях потока, для каждого из них находят соответствующую ЭДС и строят характеристику холостого хода.

В двигателях ЭДС обмотки определяется напряжением питающей сети и для режима холостого хода может быть с некоторым приближением определена до расчета магнитной цепи. Поэтому характеристика холостого хода двигателя имеет несколько иной по сравнению с генератором смысл. Она показывает, какой должна быть МДС или каким должен быть ток возбуждения холостого хода при определенной ЭДС машины.

В асинхронных двигателях ток, создающий намагничивающую силу возбуждения (намагничивающий ток), потребляется из питающей сети. Он также зависит от МДС магнитной цепи, но при неизменной ЭДС обмотки статора намагничивающий ток изменяться не будет. Поэтому для определения I_μ достаточно рассчитать МДС магнитной цепи для одного значения потока, соответствующего режиму холостого хода.

Для двигателей постоянного тока и синхронных строят полную характеристику, однако для дальнейших расчетов удобнее пользоваться не характеристикой холостого хода, а магнитной характеристикой, т. е. непосредственно зависимостью $Ф = f(F_ц)$, получаемой при расчете $F_ц$ для нескольких значений потока.

Конкретные методы расчета МДС и характеристик холостого хода приведены в главах учебника, посвященных проектированию машин различных типов.

4.7. ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ НА ПОЛЕ МАШИНЫ

Если работающую на холостом ходу электрическую машину нагрузить, то из-за увеличения тока электромагнитное поле в ней изменится, так как МДС тока нагрузки создаст поле, называемое полем реакции якоря. Под действием реакции якоря результирующий поток в машине может уменьшаться или увеличиваться в зависимости от ряда условий.

Влияние реакции якоря на характеристики машины всегда учитывают при расчете нагрузочных режимов. Прямой расчет потока, созданного двумя различными намагничивающими силами — возбуждения и реакции якоря, по-разному распределенными в активном объеме машины, очень сложен, поэтому в инженерной практике поступают следующим образом. Сначала рассчитывают магнитную цепь машины и поток при холостом ходе. Потом проводят расчет МДС реакции якоря и определяют ее влияние на поле потока возбуждения.

При расчете приходится также учитывать изменение ЭДС обмотки при нагрузке машины по сравнению с холостым ходом, вызванное падением напряжения на внутреннем сопротивлении из-за увеличения тока.

В различных типах машин реакция якоря сказывается по-разному. В асинхронных двигателях поток создается намагничивающим током статора, который определяется сопротивлением магнитной цепи и ЭДС обмотки. При расчетах приближенно принимают, что изменение намагничивающего тока при различных нагрузках обусловлено только изменением ЭДС, связанным с падением напряжения на сопротивлении обмотки статора. ЭДС при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке в процентном отношении изменяется мало, поэтому номинальный режим работы асинхронных двигателей часто рассчитывают по данным магнитной цепи, определенным для холостого хода. При более точных расчетах принимают, что намагничивающий ток изменяется в зависимости от ЭДС.

Так же поступают при расчете пусковых характеристик и в тех случаях, когда увеличение падения напряжения на сопротивлении обмотки статора при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке заметно влияет на ЭДС.

В синхронных машинах и машинах постоянного тока различают продольную и поперечную реакции якоря, т. е. раздельно рассматривают составляющие поля реакции: совпадающую с осью поля возбуждения и нормальную к нему. И продольная, и поперечная реакции якоря оказывают

влияние на поле машины, поэтому при расчетах приходится определять МДС возбуждения, необходим для обеспечения работы машины с номинальными данными, которая в общем случае отличается от МДС возбуждения холосто хода $F_{в0}$ [6].

Определение МДС возбуждения при нагрузке и учет влияния реакции якоря на характеристики рассматриваются в соответствующих главах расчета машин постоянного тока и синхронных машин.

Глава пятая. Параметры электрических машин

Параметрами электрических машин называют активные и индуктивные сопротивления ее обмоток. К параметрам относят также момент инерции ротора, значение которого входит в уравнение движения электрической машины.

5.1. АКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

Общим выражением для расчета активного сопротивления фазы обмотки электрических машин является формула

$$r = k_r \rho_v \frac{L}{q_{эф} a}. \tag{5.1}$$

где k_r — коэффициент вытеснения тока; ρ_v — удельное сопротивление материала проводника, Ом•м, при расчетной температуре v,°С; L — длина проводника фазы обмотки, м; $q_{эф}$ — площадь поперечного сечения эффективного проводника, м^2; a — число параллельных ветвей обмотки.

Удельные сопротивления некоторых наиболее часто применяемых в электрических машинах проводниковых материалов для различных расчетных температур приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Удельные электрические сопротивления материала проводников обмоток

Тип обмотки	Материал	Удельное электрическое сопротивление, Ом-м, при температуре, ° С		
		20	75	115
Обмотка из медных обмоточных проводов или неизолированной медной проволоки или шины	Медь	$\frac{1}{57}10^{-6}$	$\frac{1}{47}10^{-6}$	$\frac{1}{41}10^{-6}$
Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей	Алюминиевые шины	$\frac{1}{35}10^{-6}$	$\frac{1}{28}10^{-6}$	$\frac{1}{26}10^{-6}$
	Алюминий литой	$\frac{1}{30}10^{-6}$	$\frac{1}{24}10^{-6}$	$\frac{1}{22}10^{-6}$

Примечание. Удельное сопротивление алюминия после заливки в пазы ротора несколько повышается в связи с образованием некоторого количества раковин (воздушных включений) и с изменением структуры при охлаждении в узких пазах или участках паза. Поэтому в расчетах принимают удельные сопротивления литой алюминиевой обмотки роторов асинхронных двигателей равными $10^{-6}/21{,}5$ Ом·м при температуре 75° С и $10^{-6}/20{,}5$ Ом·м при температуре 115° С.

Согласно ГОСТ 183-74 для обмоток, предельно допустимые превышения температур которых соответствуют классам нагревостойкости А, Е и В, расчетная температура принимается равной 75° С, а для обмоток, предельно допустимые превышения температуры которых соответствуют классам нагревостойкости F и H, 115° С.

Длина проводника фазы распределенной обмотки

$$L = l_{ср} w, \tag{5.2}$$

где $l_{ср}$ — средняя длина одного витка:

$$l_{ср} = 2(l_п + l_л). \tag{5.3}$$

Длину пазовой части витка $l_п$ принимают равной длине сердечника. Длина лобовой части $l_л$ зависит от типа и конструкции обмотки, ее шага и внутреннего диаметра статора (наружного диаметра ротора или якоря).

В машинах постоянного тока общая длина обмотки якоря

$$L = l_{ср} w = l_{ср} N/2, \tag{5.4}$$

где N — число эффективных проводников в обмотке.

Число параллельных ветвей обмотки якоря в отличие от машин переменного тока обозначают $2a$, поэтому активное сопротивление одной параллельной ветви обмотки якоря

$$r_{ветви} = k_r \frac{L}{q_{эф} 2a}, \tag{5.5}$$

а сопротивление всей обмотки

$$r = k_r \frac{L}{q_{эф}(2a)^2}, \tag{5.6}$$

Коэффициент вытеснения тока k_r, зависит от характера распределения тока по сечению проводников и представляет собой отношение активного сопротивления проводника при неравномерном распределении плотности тока по сечению к сопротивлению того же проводника при одинаковой плотности тока во всех точках его сечения.

Проводники, расположенные в пазах электрических машин, находятся в зоне полей пазового рассеяния. Если в обмотке протекает переменный ток, то в проводниках возникают вихревые токи, которые, накладываясь на основной ток проводника, увеличивают или уменьшают плотность тока на различных участках их сечения.

Равномерность распределения плотности тока нарушается, и активное сопротивление проводника увеличивается.

При постоянном токе в обмотке вихревые токи не возникают и $k_r = 1$. Поэтому сопротивление проводников при постоянной по всему сечению плотности тока называют сопротивлением постоянному току.

Если проводник или какой-либо участок проводника расположен в воздухе и не находится в зоне сильного электромагнитного поля машины, то плотность тока во всех точках его сечения при расчете принимают одинаковой. Так поступают, например, в большинстве случаев при расчете сопротивлений лобовых частей обмоток, для которых принимают $k_r = 1$. Некоторое увеличение активного сопротивления, связанное с неравномерностью распределения плотности тока из-за проявления поверхностного эффекта, влияния полей лобового рассеяния, изгибов проводников и т. п., учитывают приближенно, относя его к добавочным потерям.

Расчет распределения плотности тока по сечению проводников, находящихся в пазах магнитопровода, показал, что наибольшая плотность тока будет в верхних участках поперечных сечений проводников, т. е. в участках, расположенных ближе к раскрытию паза и воздушный зазор (рис. 5.1). Ток как бы вытесняется в верхнюю часть сечения проводника, поэтому такое явление называют эффектом вытеснения тока, а коэффициент k_r, введением которого учитывают изменение активного сопротивления под действием этого эффекта, — коэффициентом вытеснения тока.

Эффект вытеснения тока приводит к увеличению расчетного активного сопротивления проводника (всегда $k_r \geq 1$). Значение коэффициента k_r зависит от частоты тока в обмотке, удельного сопротивления проводникового материала, размеров, числа и расположения проводников в пазу и от размеров паза.

Методы определения k_r приводятся в главах учебника, относящихся к расчету сопротивлений обмоток машин конкретных типов.

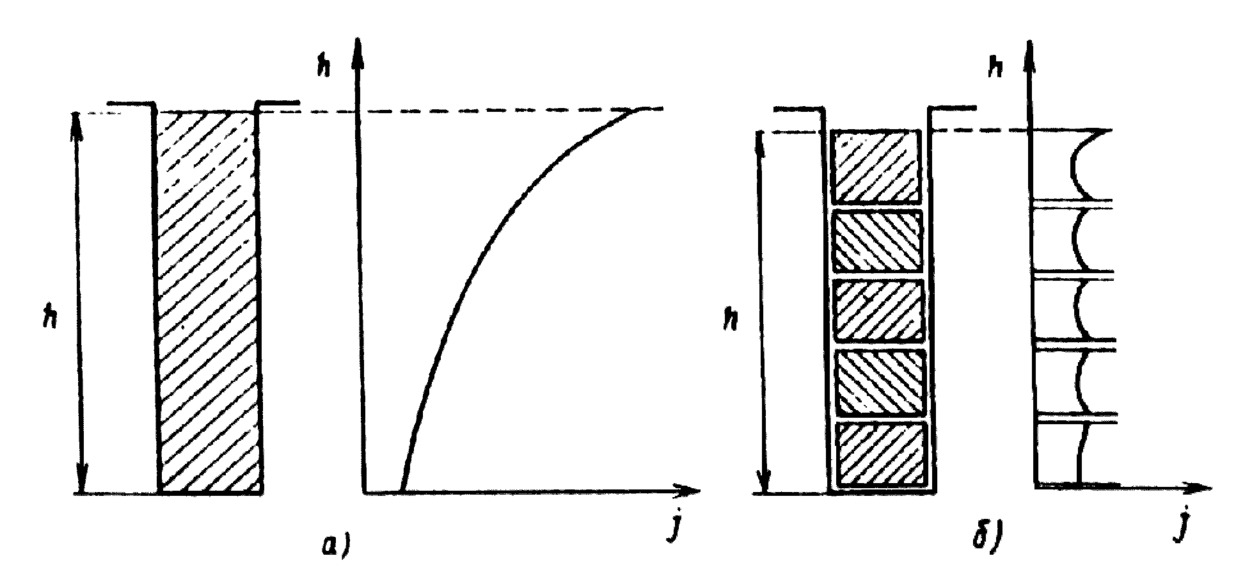


Рис. 5.1. Распределение плотности тока в проводниках обмотки под действием эффекта вытеснения тока:

а — при одном массивном проводнике в пазу; *б* — при нескольких проводниках в пазу

Площадь поперечного сечения эффективного проводника определяется размерами обмоточного провода и числом элементарных проводников в одном эффективном. Для распределенных обмоток электрических машин не применяют прямоугольные провода площадью поперечного сечения более 17. ..20 мм^2, так как при большем их сечении резко возрастают потери на вихревые токи, наводимые полем машины.

Распределенные обмотки из круглого провода наматывают обмоточными проводами площадью поперечного сечения, не превышающей 2,5 мм^2, так как при большем сечении не удается достичь удовлетворительного заполнения паза из-за возрастающей с диаметром упругости провода. В связи с этим обмотки с расчетной площадью поперечного сечения эффективного проводника, превышающей указанную цифру, наматывают не одним обмоточным проводом, а несколькими параллельными проводами одновременно. Такие проводники в отличие от параллельных, ветвей в схеме обмотки (см. гл. 3) называют элементарными. Несколько элементарных проводников образуют один эффективный, площадь поперечного сечения которого

$$q_{эф} = n_{эл}\, q_{эл} \tag{5.7}$$

где $n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном; $q_{эл}$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника, при этом принимают допущение, что плотность тока во всех элементарных проводниках, составляющих один эффективный, одинакова и размеры катушек не зависят от $n_{эл}$.

5.2. ИНДУКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТОК

Индуктивное сопротивление обмоток электрических машин определяется их взаимной индуктивностью и собственной индуктивностью. Индуктивное сопротивление взаимной индукции является характеристикой главного поля машины, поток которого сцеплен с витками как первичной, так и вторичной обмоток. Методы расчета индуктивных сопротивлений взаимной индукции различны для разных типов машин.

Индуктивные сопротивления самоиндукции, или, как их называют, индуктивные сопротивления рассеяния обмоток, характеризуют поля рассеяния, потоки которых сцеплены с витками каждой из обмоток в отдельности. Методы их расчета более сложные, но для машин различных типов имеют много общего. Поля рассеяния статора и ротора рассматривают раздельно. Потоки рассеяния каждой из обмоток, кроме того, подразделяют на три составляющие: пазового, лобового и дифференциального рассеяния. Соответственно подразделению потоков вводят понятия сопротивлений пазового, лобового и дифференциального

рассеяний, сумма которых определяет индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора или ротора. Для расчета сопротивлений рассеяния помимо размеров магнитопровода и обмоточных данных машины необходимо знать удельные коэффициенты магнитной проводимости пазового $\lambda_п$, лотового $\lambda_л$ и дифференциального $\lambda_д$ рассеяний.

Под удельной магнитной проводимостью понимают магнитную проводимость, отнесенную к длине части обмотки, расположенной в пазу или вне паза.

При расчете индуктивного сопротивления, взаимной индукции и пазового рассеяния под удельной магнитной проводимостью понимают магнитную проводимость, отнесенную к единице расчетной длины магнитопровода с учетом ослабления поля над радиальными вентиляционными каналами. При этом расчетная длина:

$$l'_\delta = l_\delta - 0{,}5\, n_к b_к \qquad (5.8)$$

где $n_к$ и $b_к$ — число и ширина радиальных вентиляционных каналов в сердечнике машины.

Так как расчет коэффициентов магнитной проводимости проводят всегда на единицу длины, то слово «удельной» в тексте обычно опускают.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния.

Предположим, что в пазу с высотой $h_п$ расположено $N_п$ проводников однослойной обмотки (рис. 5.2). Примем следующие допущения: проводники с током распределены равномерно по всей площади поперечного сечения паза, плотность тока в каждой точке сечения паза постоянна, магнитная проницаемость стали магнитопровода равна бесконечности, магнитные линии потока рассеяния в пазу прямолинейны и направлены нормально к оси паза.

Все рассмотрение будем проводить относительно единицы условной длины l'_δ. Для того чтобы учесть потокосцепление потока рассеяния с проводниками обмотки, выделим в пазу на высоте h_x от дна паза элемент высотой d_x, представляющий собой трубку потока рассеяния паза. Поток этого элемента на единицу длины обозначим $d\Phi_{\sigma x}$. Создаваемое им потокосцепление с проводниками обмотки N_x, расположенными в пазу ниже выделенного элемента, равно:

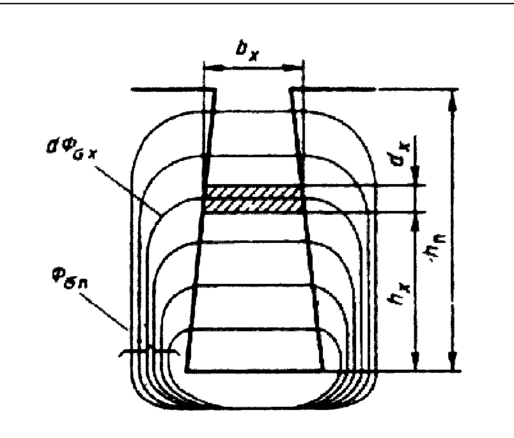


Рис. 5.2. К расчету коэффициента магнитной проводимости потока пазового рассеяния

$$d\Psi_x = d\Phi_{\sigma x} N_x \qquad (5.9)$$

При принятом допущении об отсутствии насыщения стали можно записать

$$d\Phi_{\sigma x} = \mu_0 F_x \, d\Lambda_x, \tag{5.10}$$

где $d\Lambda_x = dx / b_x$ — магнитная проводимость выделенного элемента паза; b_x — ширина паза на высоте h_x.

Учитывая, что $F_x = N_x I$, где I — ток в одном проводнике, из (5.9) и (5.10) получаем

$$d\Psi_x = \mu_0 I N_x^2 \frac{dx}{b_x}.$$

Потокосцепление всего потока рассеяния паза со всеми проводниками, расположенными в данном пазу, равно:

$$\Psi_п = \mu_0 I \int_0^{h_n} N_x^2 \frac{dx}{b_x} \tag{5.11}$$

откуда индуктивное сопротивление проводников одного паза на единицу длины

$$x'_{\sigma п} = \omega L_п = \omega \frac{\Psi_n}{I} = \omega \mu_0 \int_0^{h_n} N_x^2 \frac{dx}{b_x}$$

или (5.12)

$$x'_{\sigma п} = 2\pi f \mu_0 N_п^2 \int_0^{h_п} \left(\frac{N x}{N п} \right)^2 \frac{dx}{b_x},$$

где $N_п$ — полное число проводников в пазу.

Интеграл в правой части выражения (5.12) определяет коэффициент магнитной проводимости потока пазового рассеяния с учетом потокосцепления с проводниками паза. Его обозначают $\lambda_{п\psi}$

$$\lambda_{п\psi} = \int_0^{h_п} \left(\frac{N x}{N n} \right)^2 \frac{dx}{b_x}, \tag{5.13}$$

Так как при расчете индуктивного сопротивления рассеяния учет потокосцепления обязателен, индекс ψ в обозначении обычно опускают, тогда

$$x'_{\sigma п} = 2\pi f \mu_0 N_п^2 \lambda_п. \tag{5.14}$$

Выразив $N_п$ через число витков фазы (при условии, что обмотка фазы расположена в Z/m пазах), получим выражение для индуктивного сопротивления пазового рассеяния всей фазы с учетом условной длины поля рассеяния:

$$x_{\sigma п} \quad 4\pi f \mu_0 \, \frac{w^2}{pq} l_\delta \lambda_п. \qquad (5.15)$$

Расчетные формулы для определения $\lambda_п$ получают из (5.13) с учетом конфигурации пазов и типа обмотки.

В частном случае коэффициент магнитной проводимости прямоугольного паза полностью занятого проводниками однослойной обмотки

$$\lambda_п = \int_0^{h_п} \left(\frac{N x}{N п} \right)^2 \frac{dx}{b_x} = \int_0^{h_п} \left(\frac{S x}{S п} \right)^2 \frac{dx}{b_x} = \int_0^{h_п} \left(\frac{h x}{h п} \right)^2 \frac{dx}{b_п} = \frac{1}{3} \frac{h_п}{b_п}, \qquad (5.16)$$

так как в прямоугольном пазу ширина $b_x = b_п$ постоянна и не зависит от высоты, а при принятом допущении о равномерности распределения проводников по площади сечения паза справедливо равенство

$$\frac{N_x}{N_п} = \frac{S_x}{S_п} = \frac{h_x}{h_п}$$

где $S_п$ — площадь поперечного сечения паза, занятая проводниками с током, а $S_х$ — часть площади сечения паза, ограниченная высотой $h_х$. В более сложных случаях, например, когда проводники с током занимают не весь паз и конфигурация паза отлична от прямоугольной, коэффициент проводимости пазового рассеяния

$$\lambda_п = \int_0^{h_п} \left(\frac{S x}{S п} \right)^2 \frac{dx}{b_x} \qquad (5.17)$$

где $S_п$ и $S_х$ — площади поперечного сечения паза, занятые проводниками обмотки.

Интегрирование проводят по частям паза, причем паз делят по высоте таким образом, чтобы в пределах каждой части ширина паза могла быть выражена аналитически в зависимости от высоты, а плотность тока в каждой точке ее сечения была одинаковой. Например, для прямоугольного паза со свободной от обмотки верхней — клиновой частью (рис. 5.3) таких участков интегрирования будет три: нижняя часть паза, занятая изоляцией высотой h_0, часть паза с однослойной обмоткой высотой h_1 и клиновая часть с высотой h_2.

Коэффициент магнитной проводимости всего паза равен:

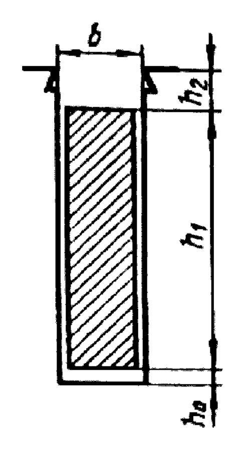


Рис. 5.3. К расчету $\lambda_п$ прямоугольного паза с однослойной обмоткой

$$\lambda_п = \lambda_0 + \lambda_1 + \lambda_2 = \int_0^{h_0} \left(\frac{S x}{S п} \right)^2 \frac{dx}{b_x} + \int_0^{h_1} \left(\frac{S x}{S п} \right)^2 \frac{dx}{b_x} + = \int_0^{h_2} \left(\frac{S x}{S n} \right)^2 \frac{dx}{b_x} = \frac{1}{3} \frac{h_1}{b} + \frac{h_2}{b} \qquad (5.18)$$

В двухслойных обмотках с укороченным шагом в части пазов размещены стороны катушек, принадлежащих разным фазам, поэтому токи в них сдвинуты во времени. Это влияние на потокосцепление пазового рассеяния в расчетных формулах учитывается коэффициентами k_β и k'_β, зависящими от укорочения шага обмотки.

Чтобы не производить интегрирование при каждом расчете для наиболее часто встречавшихся конфигураций пазов, формулы расчета пазового рассеяния приводятся в виде справочных таблиц в соответствующих главах.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния принципиально можно найти методом, аналогичным, описанному выше, однако индуктивное сопротивление лобовых частей обмоток определяется не только индуктивностью каждой из катушек, но и взаимоиндуктивными связями лобовых частей всех катушек обмотки. Это значительно усложняет расчет, так как поле рассеяния в зоне расположения лобовых частей имеет более сложный характер, чем в пазах. Криволинейность проводников в лобовых частях, разнообразные в различных машинах конфигурации поверхностей ферромагнитных деталей, окружающих лобовые части, и сложный характер индуктивных связей усложняют аналитический расчет $\lambda_л$ и требуют для его выполнения ряда упрощающих допущений. В практических расчетах коэффициент магнитной индукции лобового рассеяния обмотки $\lambda_л$ определяют по относительно простым эмпирическим формулам, полученным на основании многочисленных экспериментальных исследований, проведенных для различных типов и конструкций обмоток. При вычислении значение $\lambda_л$ также относят к единице условной длины l'_δ.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния. Полем дифференциального рассеяния называют всю совокупность полей различных гармоник в воздушном зазоре, не участвующих в создании электромагнитного момента. Потокосцепление этих полей с витками обмотки определенным образом увеличивает ее индуктивное сопротивление, что учитывается коэффициентом магнитной проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_д$. Его значение зависит от размерных соотношений воздушного зазора, числа пазов на полюс и фазу q, размеров шлица, зубцовых делений, степени демпфирования полей высших гармоник токами в проводниках, расположенных на противоположной от рассматриваемой обмотки стороне воздушного зазора, и от ряда других факторов.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки определяют по формуле, аналогичной (5.15), в которую вместо $\lambda_п$ подставляют сумму коэффициентов магнитных проводимостей пазового, лобового и дифференциального рассеяний:

$$x_\sigma \quad 4\pi f \mu_0 \, \frac{w^2}{pq} l_\delta \sum \lambda = 15{,}8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w}{100} \right)^2 \frac{l_\delta}{pq} \sum \lambda, \qquad (5.19)$$

где $\sum \lambda = \lambda_п + \lambda_л + \lambda_д$.

В асинхронных машинах индуктивное сопротивление фазы обмотки статора обозначают x_1, а обмотки ротора x_2. В синхронных машинах индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора обозначают $x_{\sigma 1}$. В машинах постоянного тока индуктивное сопротивление обмотки якоря непосредственно не рассчитывают, однако коэффициенты магнитной проводимости рассеяния определяют для расчета реактивной ЭДС секций обмотки.

Индуктивные и активные сопротивления обмоток в уравнениях напряжений являются коэффициентами перед токами. Эти параметры входят как в дифференциальные уравнения, описывающие переходные и установившиеся режимы, так и в комплексные уравнения, описывающие только установившиеся процессы [6].

Расчетные формулы для определения коэффициентов магнитных проводимостей пазового, лобового и дифференциального рассеяний непосредственно связаны с формой и размерами пазов, типом и конструкцией обмоток и размерными соотношениями зубцовой зоны. Эти факторы для разных типов машин различны. Расчет коэффициентов магнитных проводимостей рассеяния асинхронных и синхронных машин, а также машин постоянного тока приводится в соответствующих главах.

5.3. МОМЕНТ ИНЕРЦИИ

Момент инерции характеризует динамические свойства машины. Он входит в уравнение движения

$$J \frac{d\omega_р}{dt} \pm M_с = M_Э, \qquad (5.20)$$

где J — момент инерции; $\omega_р$ — угловая скорость ротора; $M_с$ — момент сопротивления; $M_Э$ — электромагнитный момент.

Момент инерции вращающегося тела равен сумме произведений масс всех его точек на квадраты их расстояний от оси вращения. Значение момента инерции тела относительно оси OZ может быть получено из интеграла

$$J_z = \int_V \rho^2 dV, \qquad (5.21)$$

где ρ — расстояние до оси вращения $0Z$; dV — элемент объема.

Для тел, имеющих простую геометрическую форму (цилиндр, диск и т. п.), значения моментов инерции приводятся в справочниках. Например, момент

инерции полого цилиндра массой m, длиной l, внешним радиусом R_1 и внутренним R_2 равен:

$$J = \frac{m}{12}(3R_1^2 + 3R_2^2 + l^2). \qquad (5.22)$$

Момент инерции сплошного цилиндра ($R_1 = R$; R_2=0)

$$J = \frac{m}{12}(3R^2 + l^2) \qquad (5.23)$$

Как видно, при одном и том же объеме момент инерции тела с меньшим радиусом будет меньше, чем при большом радиусе.

Момент инерции является мерой инертности тела, поэтому двигатели с малым моментом инерции разгоняются с большими ускорениями и быстро достигают установившейся частоты вращения. Для эксплуатации в режимах с частыми пусками стремятся выполнить двигатели с малыми моментами инерции, для чего уменьшают диаметры роторов при соответствующем увеличении длин их сердечников.

В приводах с ударной или пульсирующей нагрузкой (поршневые компрессоры) целесообразно применять двигатели, имеющие большой момент инерции, т. е. с относительно большим диаметром ротора и малой длиной. При постоянной частоте вращения кинетическая энергия вращающегося тела пропорциональна его моменту инерции, поэтому двигатели с большим моментом инерции обладают большой кинетической энергией, за счет которой преодолеваются толчки нагрузки.

Ввиду сложности конфигурации роторов электрических машин и наличия в них элементов с различной удельной массой (сталь сердечников, обмотка, изоляция, детали крепления) для расчета момента инерции ротор делят на несколько частей, имеющих сравнительно простую конфигурацию, и для каждой из них определяют J, руководствуясь формулами специальных методик.

При расчете динамических характеристик двигателя вместе с приводом учитывают моменты инерции механизмов, соединенных с валом двигателя, значения которых приводят к частоте вращения ротора. Общий приведенный момент инерции определяют по формуле

$$J_{пр} = J_1 + \sum \frac{J_{(i+1)}}{j_i^2} \qquad (5.24)$$

где J_1 — момент инерции ротора двигателя; $J_{(i+1)}$ — моменты инерции механизмов, соединенных с валом ротора; j_i — передаточное отношение i-й передачи, равное отношению частот вращения данного механизма и ротора двигателя.

Глава шестая. Потери и КПД

В электромеханических преобразователях (электрических машинах) электромеханическое преобразование энергии происходит с обязательным преобразованием части электрической энергии (режим двигателя) или механической (режим генератора) — в тепло [6]. Так как эта часть энергии «теряется» в процессе преобразования, ее принято называть потерями, а отношение полезной работы к затрачиваемой — коэффициентом полезного действия КПД.

6.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОТЕРЬ

КПД — основной показатель энергетических характеристик электрических машин и его расчет имеет важное значение при их проектировании. Чтобы определить КПД машины, надо, по возможности, точно рассчитать потери. Потери в отдельных ее частях необходимо также знать для определения в них температуры, что влияет на расчет размеров и геометрию основных конструкционных узлов электрических машин. Потери в электрических машинах делятся на основные и добавочные.

К основным потерям относятся электрические потери (потери в меди), магнитные (потери в стали) и механические потери. Электрические потери сосредоточены в обмотках электрических машин переменного тока, а в машинах постоянного тока к ним добавляются еще и потери на коллекторе. Магнитные потери возникают там, где замыкается переменный магнитный поток. Механические потери связаны с потерями в подшипниках, с трением вращающихся частей машины о воздух и в скользящих контактах. К механическим потерям относятся также вентиляционные потери, которые расходуются па охлаждение машины.

К добавочным потерям относятся потери, которые не были учтены при расчете основных потерь.

Магнитные потери и механические потери в большинстве машин не зависят от нагрузки и они являются постоянными потерями. Обычно это потери холостого хода. Электрические потери зависят от нагрузки, поэтому их относят к переменным потерям [6].

Расчету потерь при проектировании уделяется большое внимание, так как от этого зависят основные размеры и геометрия электрической машины.

6.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Электрические потери возникают в проводниках обмоток, соединительных шинах и проводах, в переходных контактах щетки — коллектор или щетки — контактные кольца.

Потери в обмотках, соединительных шинах и проводах. Электрические потери $P_э$, Вт, в обмотках и всех токоведущих частях электрической машины рассчитывают по формуле

$$P_э = \sum I_i^2 r_{vi}, \tag{6.1}$$

где r_{vi} — сопротивление данной обмотки или i-го участка токопровода, по которому протекает ток I_i, рассчитанное при необходимости с учетом влияния эффекта вытеснения тока, Ом.

Для расчета потерь сопротивление r_v должно быть приведено к расчетной температуре: для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е и В — 75° С, с изоляцией класса F или Н — 115° С (соответственно $r_{75°}$ и $r_{115°}$). Если по обмотке протекает постоянный ток, то для расчета электрических потерь часто используют выражение

$$P_э = UI, \tag{6.2}$$

где I — ток в обмотке, А; U — напряжение на концах обмотки, В.

Электрические потери рассчитывают отдельно для каждой из обмоток — обмотки фазы машины переменного тока, обмотки якоря, возбуждения и т. п., так как эти данные используют в дальнейшем для тепловых расчетов электрических машин.

Обычно электрические потери в обмотках возбуждения синхронных машин и в обмотках параллельного или независимого возбуждения машин постоянного тока выделяют из общей суммы электрических потерь и относят к потерям на возбуждение. Для синхронных машин потери в обмотках возбуждения учитывают в тепловых расчетах, а при определении КПД к потерям на возбуждение относят мощность, потребляемую возбудителем, если он расположен на одном валу с ротором или приводится во вращение от вала ротора.

При определении КПД машин постоянного тока учитывают также электрические потери в регулировочных реостатах. На тепловое состояние машин эти потери влияния не оказывают, так как реостаты располагаются отдельно от машин.

В некоторых обмотках на их различных участках протекают разные токи. В этом случае сопротивление одного из участков приводят к току другого. Так, при расчете сопротивления фазы обмотки короткозамкнутого ротора асинхронной машины сопротивление замыкающих колец приводит к току стержней обмотки.

Потери в переходных контактах. Электрические потери в переходных контактах щетки – коллектор или щетки — контактные кольца зависят от

тока, протекающего через контакт $I_{к.к}$, А, и падения напряжения под щетками $U_{щ}$, В:

$$P_{э.щ} = k\,\Delta U_{щ}\, I_{к.к.} \quad (6.3)$$

В машинах постоянного тока и синхронных коэффициент $k = 2$, так как ток проходит через два переходных контакта: под положительной и отрицательной щетками. В асинхронных машинах с фазным ротором $k = m$, где m — число фаз обмотки.

Потери в переходных контактах нельзя рассчитать точно, так как падение напряжения под щетками непостоянно и зависит от режима работы, состояния трущихся поверхностей, удельного давления щеток на коллектор или контактные кольца и от ряда других факторов, изменяющихся во время эксплуатации машины. В расчетах используют значение $\Delta U_{щ}$, взятое из технической характеристики конкретной марки щеток, которое принимают постоянным, так как $P_{э.щ}$ составляют лишь несколько процентов от общей суммы потерь в машине, погрешность расчета при этом незначительна.

6.3. МАГНИТНЫЕ ПОТЕРИ

Магнитные потери, или, как их чаще называют, потери в стали ($P_{ст}$), возникают в участках магнитопровода с переменным магнитным потоком: в статорах асинхронных и синхронных машин и якорях машин постоянного тока. В роторах синхронных машин, полюсах и станине машин постоянного тока поток постоянный и основные потери в стали отсутствуют. В роторах асинхронных машин частота тока и потока в номинальном режиме небольшая ($f_2 = s_{ном} f$), поэтому потерями в стали ротора пренебрегают [6].

Основные потери в стали состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи. Они зависят от марки стали, толщины листов магнитопровода, частоты перемагничивания и индукции. На них оказывают влияние также различные технологические факторы. В процессе штамповки листов магнитопровода образуется наклеп, который изменяет структуру стали по кромкам зубцов и увеличивает потери на гистерезис. Потери на вихревые токи возрастают в результате замыканий части листов магнитопровода между собой, возникающих из-за заусенцев, которые образуются при опиловке пазов, при забивке пазовых клиньев, из-за чрезмерной опрессовки магнитопровода и ряда других причин.

Точных аналитических формул для расчета основных потерь в стали, учитывающих влияние приведенных выше факторов, не существует. Потери в стали рассчитывают по формулам, основанным на результатах многолетних теоретических и экспериментальных исследований.

Основные потери в стали определяют как сумму потерь в зубцах и в ярме магнитопровода:

$$P_{\text{ст.осн}} = \sum k_{\text{д}i} P_{1/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B_i^2 m_i, \tag{6.4}$$

где $k_{\text{д}i}$, — коэффициент, учитывающий увеличение потерь в стали зубцов или ярма магнитопровода по технологическим причинам; $P_{1/50}$ — удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл, Вт/кг; f — частота перемагничивания, Гц. Для машин переменного тока f равна частоте питающей сети; для расчета потерь в стали якоря машин постоянного тока $f = pn/60$; B_i — индукция в зубцах или ярме магнитопровода, Тл; m_i — масса зубцов или ярма магнитопровода, кг; β — показатель степени, зависящий от марки стали и толщины листов магнитопровода. В большинстве расчетов β можно принять равным 1,3. Значения $P_{1/50}$ и β приводятся в технических характеристиках сталей; данные по выбору $k_\text{д}$ и расчету массы стали зубцов и ярма приведены в главах учебника, посвященных проектированию конкретных видов машин.

6.4. МЕХАНИЧЕСКИЕ И ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ ПОТЕРИ

Механические потери в электрических машинах состоят из потерь на трение в подшипниках, на трение вращающихся частей машины о воздух или газ и потерь на трение в скользящих контактах щетки — коллектор или щетки — контактные кольца. К вентиляционным потерям относят затраты мощности на циркуляцию охлаждающего воздуха или газа.

В машинах с самовентиляцией на вентиляционные потери расходуется часть подводимой к машине мощности. В машинах с принудительной вентиляцией или с жидкостным охлаждением для циркуляции охлаждающего агента — воздуха, газа или жидкости — устанавливают вентиляторы или компрессоры с независимым приводом. Потребляемая их двигателями мощность учитывается при расчете КПД основной машины как потери на вентиляцию.

Расчетные формулы, позволяющие найти каждую из составляющих этих видов потерь, основаны на экспериментальных данных и отражают зависимость потерь от конструкции машины, ее размеров, частоты вращения и от ряда других факторов. При проектировании машин, конструкция которых несущественно отличается от серийных, в расчете можно использовать эмпирические формулы, дающие непосредственно сумму вентиляционных и механических потерь (за исключением потерь на трение в скользящих контактах).

Расчет механических и вентиляционных потерь $P_{\text{мех}}$ можно выполнить лишь после завершения проектирования и определения размеров всех деталей машины. Во время учебного проектирования при разработке

конструкции машины следует иметь в виду качественную зависимость этого вида потерь от размерных соотношений машины. Потери на трение и вентиляцию резко увеличиваются в машинах с большим диаметром ротора и большой частотой вращения. Так, в большинстве машин эти потери пропорциональны квадрату частоты вращения и квадрату наружного диаметра статора.

Так как формулы для расчета механических потерь выведены для конкретных типов и конструктивного исполнения машин, то они приводятся в соответствующих главах учебника. Там же приведены формулы для расчета потерь на трение в скользящих контактах.

6.5. ДОБАВОЧНЫЕ ПОТЕРИ

Добавочные потери, как правило, меньше основных потерь, рассмотренных в предыдущих параграфах. Некоторые виды добавочных потерь возникают при холостом ходе и не изменяются при нагрузке машины, другие появляются только с увеличением тока нагрузки. В зависимости от этого первый вид потерь называют добавочными потерями холостого хода, а второй — добавочными потерями при нагрузке.

К добавочным потерям холостого хода относят поверхностные $P_{пов}$ и пульсационные потери $P_{пул}$:

$$P_{ст.доб} \quad P_{пов} + P_{пул}. \tag{6.5}$$

Поверхностные потери возникают из-за пульсаций индукции в воздушном зазоре. При работе машины индукция в каждой отдельно взятой точке, расположенной на одной из поверхностей магнитопровода, обращенных к зазору, будет изменяться от наибольшего значения (когда против нее на противоположной стороне зазора находится коронка зубца) до наименьшего (когда на другой стороне располагается паз). Частота таких пульсаций индукции определяется числом зубцов и частотой вращения, т. е. зубцовой частотой, Гц:

$F_Z = nZ/60$.

Вызванная этими пульсациями ЭДС создает в тонком поверхностном слое головок зубцов и полюсных наконечников вихревые токи, потери от которых и называют поверхностными.

Таким образом, наличие зубцов на статоре определяет возникновение поверхностных потерь в роторе, и, наоборот, зубцы ротора вызывают поверхностные потери на статоре. Поверхностные потери возникают во всех машинах, имеющих зубчатую поверхность на одной или на двух сторонах воздушного зазора. Эти потери имеют место в статорах и роторах

асинхронных машин и на поверхности полюсных наконечников синхронных машин и машин постоянного тока.

Для расчета $P_{пов}$ предварительно находят амплитуду пульсаций индукции в воздушном зазоре B_0 в зависимости от индукции B_δ и размерных соотношений зазора — отношения ширины раскрытия паза к зазору $b_ш/\delta$. Среднее значение удельных поверхностных потерь $P_{пов}$, т. е. отнесенных к единице площади поверхности магнитопровода статора или ротора, обращенной к воздушному зазору,

$$P'_{пов1} = k_0\,(Z_2 n/10000)^{1,5}(10^3 B_0 t_{Z2})^2; \qquad (6.6)$$

$$P'_{пов2} = k_0\,(Z_2 n/10000)^{1,5}(10^3 B_0 t_{Z1})^2, \qquad (6.7)$$

где коэффициент k_0 определяет влияние на потери толщины листов магнитопровода, марки стали и способа обработки поверхности; Z_1 и Z_2 — числа зубцов статора и ротора; n — частота вращения ротора, об/мин; t_{Z1} и t_{Z2} — зубцовые деления статора и ротора, м.

Полные поверхностные потери $P_{пов}$, Вт, получают умножением $P'_{пов}$ на площадь всей рассматриваемой поверхности статора или ротора — головок зубцов или полюсных наконечников.

Пульсационные потери $P_{пул}$ возникают в машинах, имеющих зубцы и на роторе и на статоре, например, в асинхронных машинах. Они обусловлены пульсациями потока в зубцах, что приводит к появлению вихревых токов в стали зубцов. Частота пульсаций потока и индукции в зубцах статора происходит с зубцовой частотой ротора, а частота пульсаций в зубцах ротора — с зубцовой частотой статора. Амплитуда пульсаций $B_{пул}$ зависит от среднего значения индукции в зубцах и размерных соотношений зубцовых зон. Потери $P_{пул}$, Вт, определяют раздельно для зубцов статора и ротора по следующим формулам:

$$P_{пул1} \quad (0{,}09...0{,}11)(Z_2 n/1000)^2\, B^2_{пул1}\, m_{Z1}; \qquad (6.8)$$

$$P_{пул1} \quad (0{,}09...0{,}11)(Z_1 n/1000)^2\, B^2_{пул2}\, m_{Z2}, \qquad (6.9)$$

где Z_1 и Z_2 — числа пазов статора и ротора; $B_{пул1}$ и $B_{пул2}$ — амплитуда пульсаций индукции в зубцах статора и ротора, Тл; m_{Z1} и m_{Z2} — массы зубцов статора и ротора, кг.

Поверхностные и пульсационные потери возникают во всех машинах, имеющих пазы, открытые в воздушный зазор, хотя бы на одной из его поверхностей. При закрытых пазах в магнитопроводе, расположенном на противоположной им стороне зазора, поверхностные и пульсационные потери не возникают. Например, эти потери отсутствуют на поверхности и в зубцах статора асинхронного двигателя, если его ротор выполнен с закрытыми пазами.

Относительная величина $P_{пов}$, и $P_{пул}$ в общей сумме потерь резко возрастает в машинах с большим числом пазов, с большой частотой вращения, а также при увеличении ширины шлица паза и уменьшении воздушного зазора. Это объясняется тем, что в первом случае возрастает частота, а во втором — амплитуда пульсаций индукции в воздушном зазоре и в зубцах магнитопровода. В двухполюсных асинхронных двигателях чрезмерное уменьшение воздушного зазора приводит к значительному увеличению потерь $P_{пов}$ и $P_{пул}$, что может служить причиной возрастания суммарных потерь и уменьшения КПД двигателя.

Добавочные потери при нагрузке возникают как в проводниках обмоток, так и в стали на отдельных участках магнитопровода. Ток нагрузки создает потоки рассеяния, сцепленные с проводниками обмоток. В результате этого в проводниках наводятся вихревые токи, вызывающие добавочные потери, не учтенные ранее в расчете. В машинах постоянного тока увеличение потерь при нагрузке связано также с коммутационным процессом, при котором токи в секциях изменяют свое направление. Поля, созданные высшими гармониками МДС обмоток, и зубцовые гармоники поля с ростом нагрузки машины увеличивают поверхностные и пульсационные потери. В машинах постоянного тока увеличение добавочных потерь в стали с ростом нагрузки связано также с искажением магнитного поля под действием поперечной реакции якоря.

Расчет отдельных добавочных потерь при нагрузке проводят обычно лишь для машин большой мощности. Для машин общего назначения эти потери учитывают приближенно. Согласно ГОСТ 11828—86 добавочные потери при нагрузке для асинхронных и синхронных машин и машин постоянного тока с компенсационной обмоткой при расчете берут равными 0,5 % потребляемой номинальной мощности, а для машин постоянного тока без компенсационной обмотки 1 % [6].

6.6. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Общее выражение для коэффициента полезного действия имеет вид

$$\eta \quad P_2/P_1. \tag{6.10}$$

Для генераторов P_2 — активная мощность, отдаваемая в сеть; P_1 — механическая мощность, затрачиваемая на вращение вала генератора. Для двигателей P_2 — механическая мощность на валу и P_1 — активная электрическая мощность, потребляемая двигателем.

Расчет электрических машин обычно проводят, исходя из заданной мощности P_2, поэтому для любых значений нагрузки КПД, %, удобнее рассчитывать по формуле

$$\eta = 100\left(1 - \frac{\sum P}{P_2 + \sum P}\right) = 100\left(1 - \frac{\sum P}{P_1}\right) \tag{6.11}$$

где P_1 и P_2 — потребляемая мощность, Вт, и нагрузка, для которой определяется КПД; ΣP – сумма всех потерь в машине при данной нагрузке, Вт.

Современные электрические машины имеют высокий КПД. Так, КПД машин мощностью несколько тысяч и более киловатт достигает 95. ..98 %, мощностью несколько сот киловатт — 88. ..92 %, мощностью около 10 кВт — 83... 88 %. Лишь КПД машин малой мощности, до нескольких десятков ватт, составляет 30.. .40 %.

КПД электрической машины изменяется с изменением ее нагрузки. При увеличении нагрузки от холостого хода до номинальной КПД сначала быстро увеличивается, достигает максимального значения, после чего несколько снижается. Для оценки нагрузки, при которой КПД будет наибольшим, разделим все виды потерь в машине на три группы: постоянные, не изменяющиеся от нагрузки потери, обозначим для номинального режима $П_1$, потери, пропорциональные току, $П_2$, потери, пропорциональные квадрату тока, $П_3$. К первой группе отнесем все виды механических и вентиляционных потерь и потери в стали, ко второй — например, электрические потери в щеточном контакте, к третьей — электрические потери в обмотках.

Введем понятие коэффициента нагрузки, равного отношению нагрузки электрической машины к ее номинальной мощности:

$$k_{наг} = P_2/P_{ном}. \tag{6.12}$$

При условии, что во время работы машины ее частота вращения, напряжение сети, ток возбуждения и cos φ остаются постоянными, можно записать

$$k_{наг} = P_2/P_{2ном} = I/I_{ном}. \tag{6.13}$$

Тогда КПД при любой нагрузке электрической машины с учетом принятых обозначений групп потерь

$$\eta = \frac{k_{наг} P_{2ном}}{k_{наг} P_{2ном} + П_1 + k_{наг} П_2 + k_{наг}^2 П_3}. \tag{6.14}$$

Для определения условия, при котором КПД будет максимальным, приравняем к нулю производную этой функции:

$$\frac{d\eta}{d\,k_{наг}} = \frac{(П_1 - k_{наг}^2 П_3)\, P_{2нно}}{\left(k_{наг} P_{2ном} + П_1 + k_{наг} П_2 + k_{наг}^2 П_3\right)^2} = 0 \tag{6.15}$$

Таким образом, наибольший КПД у электрической машины будет при такой нагрузке, при которой потери, зависящие от квадрата тока ($k^2_{наг}П_3$),

будут равны потерям, не зависящим от нагрузки, $П_1$. С известным приближением это условие сводится к условию равенства электрических потерь в обмотках сумме механических, вентиляционных и магнитных потерь в машине.

Электрические потери в машине данной мощности определяются, в основном, плотностью тока, потери в стали — уровнем индукций на участках магнитопровода. Рекомендации современных методик проектирования электрических машин по выбору электромагнитных нагрузок дают такое соотношение потерь в машине, что наибольшего значения КПД составляет при $k_{наг}$ = 0,7—0,8. Это оправдано тем, что при дискретной шкале мощностей электрические машины, особенно двигатели, в большинстве случаев работают с нагрузкой, несколько меньшей, чем номинальная мощность [6].

Если в техническом задании предлагается спроектировать машину с наибольшим КПД в номинальном режиме, то выбор электромагнитных нагрузок должен быть проведен так, чтобы электрические потери в обмотках в номинальном режиме ($k_{наг}$ = 1) были равны сумме потерь в стали, механических и вентиляционных. Для этого должна быть несколько увеличена индукция по сравнению с обычно рекомендуемыми значениями и уменьшена плотность тока в обмотках.

Глава седьмая. Тепловой и вентиляционный расчет электрических машин

В активных и конструктивных элементах электрических машин выделяется значительное количество тепла. Мощность тепловых потоков, выделяемых во внутренних объемах машины, такова, что для их отвода в окружающую среду необходимо создавать специальные принудительные системы охлаждения.

7.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕПЛООТДАЧИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

От того, как рассчитана и реализована система охлаждения электрической машины, во многом определяются ее технико-экономические показатели. К сожалению, в планах подготовки инженеров-электромехаников мало часов отводится вопросам теплофизики, которые по своему научно-техническому содержанию мало уступают электродинамике. Поэтому в курсе проектирования электрических машин используются упрощенные тепловые и вентиляционные расчеты, а на электромеханических заводах и НИИ есть группы инженеров-теплофизиков, занимающихся тепловыми и вентиляционными расчетами.

Тепловую напряженность машины можно оценить по мощности потерь, приходящейся на единицу наружной поверхности. Однако полная тепловая схема машины представляет собой сложную многомерную тепловую систему. Температурные поля в общем случае, изменяются по каждой из трех пространственных координат и не остаются постоянными с течением времени.

Для описания трехмерного температурного поля машины обычно используют уравнение теплового состояния в общем виде

$$\vartheta = \vartheta(x, y, z, t), \tag{7.1}$$

где ϑ — температура точки тела в заданный момент; x, y, z — пространственные координаты; t время.

Тепловая энергия, выделяемая на элементах машин при ее работе, может вызывать недопустимое повышение температуры активных и конструктивных элементов машины, снижение электрической и механической прочности изоляции обмоток, уменьшение времени безотказной работы машины. Поэтому определение тепловых потоков, расчет изменения температуры в пространстве внутреннего объема и на поверхностях охлаждения машины являются важными разделами проектирования электрической машины. На

основе этого расчета оценивается тепловое состояние машины, выбираются такие тепловые и вентиляционные схемы и способы ее охлаждения, при которых превышение температуры частей электрической машины не превосходит пределов допускаемых значений, установленных ГОСТ 183—74 (табл. 7.1).

Температура частей электрической машины зависит от температуры охлаждающей среды. В связи с неизбежными колебаниями температуры охлаждающей среды принято тепловую напряженность частей электрической машины характеризовать превышением их температуры над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{охл}, \tag{7.2}$$

где ϑ — температура рассматриваемой части электрической машины; $\vartheta_{охл}$ — температура охлаждающей среды.

Номинальные данные электрической машины (мощность, напряжение, ток, частота вращения, коэффициент мощности, КПД и др.) обычно относятся к работе машины на высоте до 1000 м над уровнем моря при температуре окружающей среды до +40° С и охлаждающей воды до +30° С, но не выше +33° С, если в стандартах или технических условиях на проектируемую машину не указаны другие требования [17].

При длительной работе электрической машины влияние на тепловой режим и нагрев ее отдельных частей оказывают изменения напряжения сети, частоты, нагрузки и другие факторы.

Согласно ГОСТ 183—74 на общие технические требования к электрическим машинам установлены восемь номинальных режимов работы, из которых наиболее часто встречаются следующие: 1) продолжительный (условное обозначение S1); 2) кратковременным (S2) с длительностью рабочего периода 10, 30, 60 и 90 мин; 3) повторно-кратковременный (S3) с относительной продолжительностью включения ПВ-15, 25, 40 и 60 % длительности одного цикла работы, равного 10 мин; 4) перемежающийся с чередованием неизменной номинальной нагрузки и холостого хода (S6) без выключения машины с продолжительностью нагрузки ПН-15, 25, 40 и 60 % длительности одного цикла работы, равного 10 мин.

Предельная допускаемая температура для какой-либо части электрической машины определяется как сумма допускаемого превышения температуры, взятой из табл. 7.1, и предельной допускаемой температуры охлаждающей среды +40° С, принятой для электрических машин общего назначения.

Предельная допускаемая температура подшипников не должна превышать следующих значений: для подшипников скольжения 80° С (температура масла не должна быть при этом выше 65° С), для подшипников качения 100° С.

Таблица 7.1. **предельно допустимые превышения температуры частей электрических машин при температуре газообразной охлаждающей среды +40° С и высоте над уровнем моря не более 1000 м (по ГОСТ 183—74)**

№ п/п	Часть электрических машин	Изоляционный материал (по ГОСТ 8865—87)														
		A			E			B			C			H		
		методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в паз	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в паз	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в паз	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в паз	методом термометра	методом сопротивления	методом температурных индикаторов, уложенных в паз
1	Обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВ·А и выше или с длиной сердечника 1 м и более	—	60	60	—	70	70	—	80	80	—	100	100	—	125	125
2	Обмотки:															
	а) обмотки переменного тока машин мощностью 5000 кВ·А с длиной сердечника менее 1 м															
	б) обмотки возбуждения машин постоянного и переменного тока с возбуждением постоянным током, кроме указанных в пп. 3,4 и 5 настоящей таблицы	50	60	—	65	75	—	70	80	—	85	100	—	105	125	—
	в) якорные обмотки, соединенные с коллектором															

3	Обмотки возбуждения неявнополюсных машин с возбуждением постоянным током	—	—	—	—	—	—	—	90	—	—	100	—	—	135	—
4	Однорядные обмотки возбуждения с оголенными поверхностями	65	65	—	80	80	—	90	90	—	110	110	—	135	135	—
5	Обмотки возбуждения малого сопротивления, имеющие несколько слоев и компенсационные обмотки	60	60	—	75	75	—	80	80	—	100	100	—	125	125	—
6	Изолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	60	—	—	75	—	—	80	—	—	100	—	—	125	—	—
7	Неизолированные обмотки, непрерывно замкнутые на себя	Превышение температуры этих частей не должно достигать значений, которые создавали бы опасность повреждения изоляционных или других смежных материалов самих элементов и соседних частей														
8	Сердечники и другие стальные части, не соприкасающиеся с изолированными обмотками															
9	Сердечники и другие стальные части, соприкасающиеся с изолированными обмотками	60	—	60	75	—	75	80	—	80	100	—	100	125	—	125
10	Коллекторы и контактные кольца незащищенные и защищенные	60	—	—	70	—	—	80	—	—	90	—	—	100	—	—

Измерение температуры отдельных частей электрической машины при тепловых испытаниях осуществляют методами термометра, сопротивления (только для обмоток) и температурных индикаторов.

При измерениях методом термометра согласно ГОСТ 11828—86 температура фиксируется термометром, прикладываемым к доступным местам.

Для определения средней температуры обмоток изготовленных из меди, используют следующую формулу:

$$\Delta\vartheta = \frac{r_{\vartheta} - r_x}{r_x}\left(235 + \vartheta_x\right) + \vartheta_x - \vartheta_{охл}, \tag{7.3}$$

где r_{ϑ} — сопротивление обмотки в нагретом состоянии, Ом; r_x сопротивление обмотки в холодном состоянии, Ом; ϑ_x — температура обмотки в холодном состоянии, °С.

Для обмоток, изготовленных из алюминия, вместо числа 235 следует подставить число 245.

Согласно ГОСТ 20459—87 обозначения способов охлаждения электрических машин, принятые в технической документации всех видов, состоит из латинских букв IC — первых букв английских слов International Cooling и следующих за ними буквы, характеризующей вид хладагента (А — воздух, Н — водород, N — азот, С — диоксид углерода, Fr — фреон, W — вода, U масло, Кг — керосин) и двух цифр: первая условно обозначает устройство цепи для циркуляции хладагента, вторая — способ перемещения хладагента. Условное обозначение устройства цепи циркуляции содержит 10 цифр (от 0 до 9): 0 — свободная циркуляция наружного воздуха; 1—3 — охлаждение при помощи проводящей (1), отводящей (2) или обеих труб (3); 4 — охлаждение наружной поверхности с использованием окружающей среды; 5,6 — охлаждение окружающей средой при помощи встроенного (5) или пристроенного (6) теплообменника; 7, 8 — охлаждение при помощи встроенного (7) или пристроенного (8) охладителя; 9 — охлаждение при помощи охладителя, установленного отдельно от машины. Способы перемещения хладагента обозначаются второй цифрой: 0 — свободная конвекция; 1 — самовентиляция; 2 и 3 — перемещение хладагента встроенным или пристроенным устройством, установленным непосредственно на валу машины (3) или связанным с валом через зубчатую или ременную передачу (2); 5 и 6 — то же, при независимом устройстве; 7 — перемещение хладагента осуществляется отдельным устройством.

Если в машинах применяют двухконтурные системы охлаждения, то способы охлаждения обозначают, начиная с цепи более низкой температуры. Например,

закрытая машина с водородным охлаждением и встроенным водяным охладителем, циркуляция воды, в охладителе которой осуществляется отдельным и независимым от охлаждаемой машины насосом или от водопроводной сети, имеет обозначение IC37H71. Закрытая машина, которая имеет обмотку статора с непосредственным водяным охлаждением и обмотку ротора, охлаждаемую водородом, и циркуляция воды в обмотке статора и которой осуществляется отдельным насосом, обозначается так: ICW87 — обмотка статора, H71 — обмотка ротора.

Самой простой схемой охлаждения, которая применяется преимущественно в машинах мощностью до 1 кВт, является схема с естественной вентиляцией без применения особых средств для повышения интенсивности охлаждения.

Большинство электрических машин общего назначения, за исключением турбо- и гидрогенераторов, а также синхронных компенсаторов охлаждаются воздухом и имеют принудительную схему вентиляции. В случае принудительной вентиляции цепь охлаждения машины может быть:

разомкнутой — воздух поступает из окружающей среды, проходит каналы тракта охлаждения машины и выбрасывается снова в окружающую среду;

замкнутой — поток охлаждающего воздуха не связан с окружающей средой, а циркулирует по замкнутому контуру, включающему в себя и внутренний объем закрытой машины. При замкнутой вентиляции охлаждающий воздух отдает свою теплоту либо воде в специальном газоохладителе, либо корпусу машины через его внутреннюю поверхность, как это осуществляется, например, в асинхронных двигателях закрытого исполнения, обдуваемых наружным вентилятором.

В зависимости от направления движения воздуха (газа) внутри машины различают аксиальную, аксиально-радиальную и радиальную схемы вентиляции.

Если электрическая машина имеет схему самовентиляции, то напор в вентиляционной системе создастся вентилятором, установленным на валу машины. Эта схема вентиляции подразделяется на два класса: нагнетательную и вытяжную. При нагнетательной схеме вентиляции охлажденный газ под воздействием избыточного давления, создаваемого нагнетателем, поступает в вентиляционные каналы активной зоны машины. При вытяжной схеме вентиляции охлаждающий газ поступает в вентиляционные каналы машины под действием разряжения, создаваемого вентилятором.

Вытяжная вентиляция обладает тем преимуществом, что газ поступает в машину без предварительного его подогрева вентилятором, что несколько снижает превышение температуры обмоток.

В практике электромашиностроения применяют как нагнетательные, так и вытяжные схемы вентиляции, которые по числу струй бывают одноструйными и

многоструйными. При многоструйной схеме вентиляции каналы каждой струи имеют независимые выходы подогретого воздуха в сборную зону перед нагнетателем.

Схему принудительной вентиляции с помощью независимого вентилятора применяют в машинах с широким диапазоном регулирования частоты вращения, когда система самовентиляции при малых частотах вращения ротора не является эффективной. По этой схеме выполняют отдельные модификации асинхронных двигателей; серии 4А и машин постоянного тока серии 2П.

По способу отвода тепла от тепловыделяющих элементов электрических машин различают схемы косвенного и непосредственного охлаждения: в первом случае отвод тепла осуществляется открытых поверхностей активных частей машины, во втором хладагент по специальным каналам подводится к проводникам обмоток машины, отбирая тепло непосредственно от обмоток.

Все электрические машины общего назначения выполняются системе воздушного косвенного охлаждения.

Особенности конструктивного исполнения отдельных с воздушным косвенным охлаждением определили и их схему вентиляции: крупные машины постоянного тока и синхронные двигатели выполняются преимущественно с радиальной схемой вентиляции. Асинхронные машины большой мощности имеют радиальную, аксиальную и аксиально-радиальную схемы.

С ростом единичной мощности электрических машин возрастают удельные потери в объеме машины, поэтому воздушные системы охлаждения становятся неэффективными и для охлаждения турбо- и гидрогенераторов и синхронных компенсаторов применяют схемы косвенного охлаждения водородом совместно со схемами непосредственно жидкостного охлаждения. В качестве хладагента в этих случаях используют воду, которая обеспечивает самую высокую по сравнению с другими жидкостями эффективность охлаждения. Схема непосредственного водяного охлаждения обмоток статора и ротора находит применение в конструкциях мощных турбо- и гидрогенераторов.

Система непосредственного водяного охлаждения обычно сочетается с системой косвенного газового охлаждения активных частей машины [16, 17].

7.2. ТЕПЛООБМЕН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Теплообмен в электрических машинах происходит путем теплопроводности, конвективного теплообмена и излучения.

Количество тепла Q, передаваемое за единицу времени через произвольную изотермическую поверхность S, прямо пропорционально температурному градиенту $grand\Delta\vartheta$ в направлении теплового потока:

$$q = -\lambda grad\Delta\vartheta, \quad (7.4)$$

где $q = Q/S$ — плотность теплового потока, Вт/м²; λ — теплопроводность материала тела; знак минус показывает, что тепловой поток распространяется в направлении уменьшения температуры, т. е. от точки тела с большей температурой к точке, имеющей меньшую температуру.

При одномерном распространении тепла, например, в направлении оси x имеем

$$grad\Delta\vartheta = d(\Delta\vartheta)/dx. \quad (7.5)$$

Теплопроводность λ характеризует способность вещества проводить тепло, определяется физическим свойством вещества и зависит от его состава, температуры и давления (для газообразных веществ). Наиболее достоверные значения теплопроводности получают экспериментальным путем.

В табл. 7.2 приведены значения теплопроводности различных материалов, применяемых в электромашиностроении.

Таблица 7.2. **Значения теплопроводности материалов**

Материал	Вт/(м· °С)
Медь	380…395
Алюминий	198…220
Серебро	420
Сталь листовая электротехническая марок:	
1211, 1212, 1213	35…37
1311, 1411, 1412, 1413	19…24
1511, 1512, 1513	15…18
Сталь листовая электротехническая, шихтованная поперек пакетов:	
лист 0,5 мм, покрытие лаком	3,1
сталь 1521 0,35 мм, пропитка компаундом ЭК-1М	1,9
Дюралюминий	128
Сплавы алюминия (АК3, АК4, АКМ2-1)	147…159
Сталь (марки 08, 10, 20, 35, 45)	48…64
Стеклополотно	0,17…0,18
Стеклолакоткань	0,18…0,21
Слюда (флогонит)	0,51
Миканит ГФС	0,21…0,41
Пленка ПЭТФ:	
лумиррор	0,11
мелинекс	0,13
терфан	0,17
лавсан	0,21
Пленка полиимид	0,27

Пленка фторопласт 3/4	0,10/0,22
Пленка экскапон	0,20
Стеклослюдинит (ФС25К-40/ГС25КН)	0,12/0,24
Стеклотекстолит	0,33…0,43
Текстолит	0,17..0,22
Электронит	0,12…0,18
Изоляция пазовая обмоток якоря машин постоянного тока и роторов машин переменного тока:	
классы А, Е	0,10
классы В, F, Н	0.16
То же статорных обмоток асинхронных машин:	
классы А, В, Е	0,10
классы В (компаундированная), F, Н	0,16
Изоляция монолит-2 различного состава	0,19…0,32
Воздух при $\rho = 101$ кПа, $\vartheta = 40\,^{\circ}$ С	0,0266

Используя законы Фурье и сохранения энергии, можно привести уравнение теплового состояния (7.1) к дифференциальному уравнению теплопроводности, которое связывает временные и пространственные изменения температуры рассматриваемого элемента машины:

$$\rho c \frac{\partial(\Delta\vartheta)}{\partial t} = div(\lambda grand \Delta\vartheta) + p\,, \tag{7.6}$$

где ρ — плотность окружающей среды, кг/м^3; c — удельная теплоемкость элемента электрической машины, Дж/(кг· ° С); p — мощность внутренних источников тепла, представляющая собой количество теплоты, выделяемое в единице объема элемента машины за единицу времени.

Уравнение (7.6) можно использовать для анализа нагревания; тела в стационарных и нестационарных режимах.

Теплообмен между поверхностью твердого тела и жидкой (газообразной) средой, конвективный теплообмен описывается экспериментальным законом Ньютона—Рихмана, связывающим плотность теплового потока на поверхности q с температурами поверхности $\vartheta_п$ и среды $\vartheta_{охл}$:

$$q = Q / S = a(\vartheta_п - \vartheta_{охл}) = a\Delta\vartheta\,. \tag{7.7}$$

Соответственно перепад температуры между поверхностью охлаждающей средой составит

$$\Delta\vartheta = q / a\,, \tag{7.8}$$

где a — коэффициент теплоотдачи поверхности, Вт/(м^2·°С), характеризующий интенсивность теплообмена [16, 17].

Теплообмен путем излучения для электрических машин, работающих в обычных условиях, не учитывается из-за небольшой его доли в общем процессе

теплообмена. Отвод тепла путем излучения становится основным при работе машин в вакууме.

Испарительное охлаждение в машинах общепромышленного применения практически не используется.

7.3. НЕУСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ НАГРЕВАНИЯ ОДНОРОДНОГО ТЕЛА

Испытания электрических машин на нагрев показывают, что в области номинальных нагрузок машины общего назначения, имеющие сравнительно низкие удельные тепловые нагрузки, подчиняются закону нагревания идеального однородного тела. В данном случае с достаточной точностью можно считать, что тепло, рассеиваемое с поверхности машины S, пропорционально превышении температуры поверхности (7.4). При неизменных потерях Q, выделяемых в объеме машины, дифференциальное уравнение нагревания, выражающее баланс энергии за время dt, будет иметь вид

$$Qdt = cmd(\Delta\vartheta) + \alpha S\Delta\vartheta dt, \tag{7.9}$$

где c эквивалентная удельная теплоемкость машины, Дж/(кг· ° С); m — масса машины, кг.

В установившемся режиме, когда достигнуто конечное превышение температуры машины, все выделяемое тепло рассеивается в окружающую среду:

$$Qdt = \alpha S\Delta\vartheta_{\infty} dt. \tag{7.10}$$

или

$$Q = \alpha S\Delta\vartheta_{\infty}.$$

Общим решением уравнения (7.5) при одномерном выделении теплоты будет

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 + (\Delta\vartheta_{\infty} - \Delta\vartheta_0)(1 - e^{-t/T_1}), \tag{7.11}$$

где $\Delta\vartheta_0$ — начальное превышение температуры машины; T_1 — постоянная времени нагревания машины, равная $T_1 = cm/aS$.

При $\Delta\vartheta_{\infty} > \Delta\vartheta_0$ уравнение (7.11) соответствует процессу нагревания при $\Delta\vartheta_{\infty} < \Delta\vartheta_0$ — процессу охлаждения. Кривые нагревания и охлаждения машины представлены на рис. 7.1 и 7.2. Если в процессе нагревания $\Delta\vartheta_0 = 0$, то уравнение (7.11) принимает вид

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{\infty}(1 - e^{-t/T_1}). \tag{7.12}$$

Если при охлаждении конечная температура машины сравняется с температурой окружающей среды, то $\Delta\vartheta_{\infty} = 0$ и уравнение охлаждения по (7.11) имеет вид

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_0 e^{-t/T_1}. \tag{7.13}$$

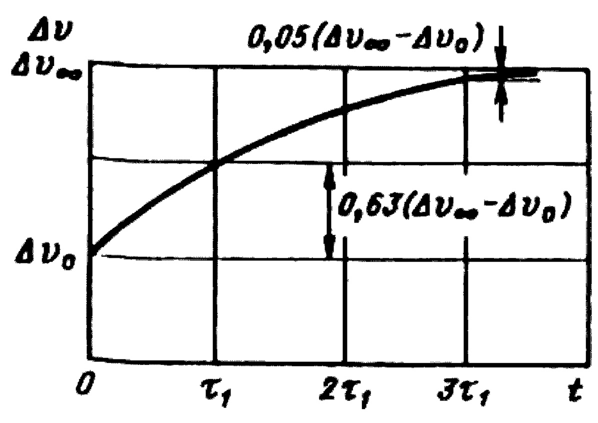


Рис. 7.1. Кривая нагревания машины

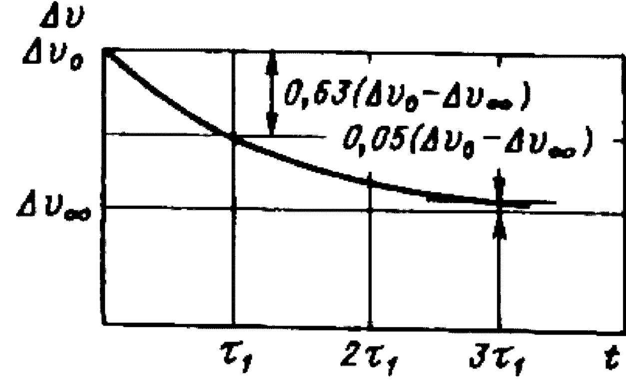


Рис. 7.2. Кривая охлаждения машины

При экспоненциальном законе нарастания температуру можно считать установившейся (в пределах точности до 5 %) через время $t=(3-4)T_1$. Согласно (7.10) ее значение составит

$$\Delta\vartheta_{\infty}=Q/aS. \qquad (7.14)$$

Уравнение (7.6) позволяет рассчитать нагрев машины для большинства неустановившихся тепловых режимов [16, 17].

7.4. СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

Основными источниками выделения теплоты в электрической машине являются обмотка, элементы магнитопровода и конструктивные элементы, в которых возникают потери от перемагничивания. Тепло выделяется и в скользящем контакте. Механические потери, в том числе и вентиляционные, также увеличивают нагрев машины.

На пути движения тепловых потоков от источников тепла происходит перепад температуры в активных частях машины, в изоляции и между охлаждающими поверхностями и охлаждающей средой. В тепловом расчете определяются все внутренние перепады и превышения температуры внешней поверхности охлаждаемых частей электрической машины над температурой охлаждающего воздуха.

В практических расчетах часто ограничиваются определение среднего превышения температуры обмоток, т. е. допускают, что температура обмоток в стали пакетов статора (ротора) постоянна.

Для определения полного превышения температуры обмоток необходимо учесть подогрев охлаждающей среды, которая, поступая машину, воспринимает тепло от нагретых частей.

Повышение технического уровня новых серий электрических машин ставит задачу поиска оптимальных вариантов, основанных на весьма точных методах электромагнитного и теплового расчетов разрабатываемой машины. Поэтому с развитием электромашиностроения совершенствуются и развиваются методы

анализа и расчета тепловых процессов в машинах, более точно рассчитываются превышения температуры всех элементов машины.

Теплопроводность однородной стенки при отсутствии внутренних источников потерь. Количество тепла Q, проходящего через однородную стенку (изоляцию, воздушный зазор, проводник, лист стали и т.д.), пропорционально перепаду температуры стенки $\Delta\vartheta_с$, площади стенки $S_с$ в плоскости, перпендикулярной движению теплового потока, и теплопроводности $\lambda_с$ материала стенки и обратно пропорционально толщине стенки $b_с$:

$$Q = \Delta\vartheta_с \frac{\lambda_с S_с}{b_с}. \qquad (7.15)$$

Соответственно перепад установившейся температуры составит

$$\Delta\vartheta_п = Q\frac{b_c}{\lambda_c S_c}. \qquad (7.16)$$

Введем понятие теплового сопротивления стенки R_T, определяющего перепад температуры, аналогично электрическому сопротивлению $R_Э$ вызывающему соответствующее падение напряжения в цепи:

$$R_T = b/\lambda S \qquad R_Э = \rho l/S. \qquad (7.17)$$

В многослойной изоляционной стенке суммарный перепад температуры равен сумме перепадов в отдельных слоях. Соответственно суммарное тепловое сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных слоев изоляции:

$$R_{из} = R_{из1} + R_{из2} + \ldots + R_{изn},$$

где $R_{изn} = b_{cn}/(\lambda_{cn} S_{cn})$ — тепловое сопротивление n-го слоя стенки паза толщиной b_{cn}. Так как $S_{из1} = S_{из2} = \ldots = S_{изn}$, то

$$b_{из}/\lambda_{экв} = b_{из1}/\lambda_{из1} + b_{из2}/\lambda_{из2} + \ldots + b_{изn}/\lambda_{изn} \qquad (7.18)$$

Эквивалентная теплопроводность многослойной изоляционной стенки с общей толщиной $b_{из}$ равна

$$\lambda_{экв} = \frac{b_{из}}{b_{из1}/\lambda_{из1} + b_{из2}/\lambda_{из2} + \ldots + b_{изn}/\lambda_{изn}}. \qquad (7.19)$$

Наличие воздушных прослоек в слоистой изоляции резко снижает результирующую теплопроводность изоляции. Для улучшения теплопроводности многослойной изоляции обмоток электрических машин и повышения ее электрической прочности предусматривают компаундирование обмоток специальными лаками и компаундами. Поэтому при выполнении тепловых расчетов электрических машин обычно используют эквивалентные значения теплопроводности, полученные экспериментальным путем для соответствующего класса изоляции (табл. 7.2).

Теплоотдача с поверхности. Отвод тепла охлаждающей средой с поверхности элементов машины определяется по формуле

$$Q = \alpha \Delta \vartheta_{п} S_{п}, \tag{7.20}$$

где α — коэффициент теплоотдачи, зависящий от характера течения, скорости, физических свойств охлаждающей среды и от шероховатости поверхности охлаждения; $\Delta\vartheta_{п}$ — перепад температуры на поверхности охлаждения, °С; $S_{п}$ — площадь поверхности охлаждения м^2

Выражение (7.20) по аналогии с электрической цепью можно представить в следующем виде:

$$\Delta\vartheta_{п} = R_{п} Q_{п}, \tag{7.21}$$

где $R_{п} = 1/\alpha S_{п}$ — тепловое сопротивление поверхности нагретого тела.

Коэффициент теплоотдачи α определяют экспериментально на натурных образцах или моделях. Результаты экспериментов обрабатывают и представляют в таком виде, чтобы формы уравнений для модели и реальной машины были одинаковыми. Эти уравнения совпадают, если вводятся критерии подобия. В тепловых расчетах электрических машин используются наиболее часто следующие критерии подобия.

1. Число Нуссельта

$$\mathrm{Nu} = \alpha d / \lambda, \tag{7.22}$$

где α — коэффициент теплоотдачи; d — характерный линейный размер; λ — теплопроводность охлаждающей среды, движущейся относительно рассматриваемой стенки.

Характерный линейный размер для каналов определяется как отношение площади сечения $S_{к}$ канала к его периметру $П_{к}$. Этот параметр называется гидравлическим диаметром канала:

$$d_{г} = S_{к} / П_{к}. \tag{7.23}$$

Для канала круглого сечения гидравлический диаметр равен геометрическому диаметру сечения канала. При прямоугольном сечении канала со сторонами b и h гидравлический диаметр согласно (7.23) равен:

$$d_{г} = 2bh/(b+h); \tag{7.24}$$

для квадратного сечения при $b = h$

$$d_{г} = b;$$

для узких прямоугольных каналов при $h \gg b$

$$d_{г} \approx 2b$$

Для открытых поверхностей охлаждения характерная длина принимается равной длине или высоте охлаждаемой поверхности.

2. Число Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = v d_{\text{г}} / \nu, \tag{7.25}$$

где v — скорость течения охлаждающей среды в канале, м/с; $d_{\text{г}}$ — гидравлический диаметр канала; ν — коэффициент кинематической вязкости охлаждающей среды.

3. Число Прандтля

$$\mathrm{Pr} = \nu / \alpha, \tag{7.26}$$

где $\alpha = \lambda / C_p \rho$ — температуропроводность, м²/с; λ — теплопроводность; C_p — удельная теплоемкость; ρ — плотность окружающей среды.

4. Число Тейлора

$$Ta = \omega r_1^{0,5} \delta^{1,5} / \nu, \tag{7.27}$$

где r_1 — радиус ротора; δ — воздушный зазор; ω — угловая скорость прошения ротора.

Число Тейлора характеризует течение воздушного потока в цилиндрических коаксиальных каналах, одна из поверхностей которых вращается.

В электрических машинах с воздушным охлаждением на долю тепловых сопротивлений поверхностей охлаждения приходится от 50 до 80% общего теплового сопротивления электрической машины. Теплообмен в каналах и с поверхностей охлаждения машин обычно рассчитывается по формулам, полученным при опытных исследованиях конвективного теплообмена на моделях и натурных машинах. В табл. 7.3 приводятся некоторые формулы, которые используют в тепловых расчетах электрических машин [16].

Таблица 7.3. **Теплообмен отдельных поверхностей охлаждения электрических машин**

Участок охлаждения	Уравнение теплоотдачи
Теплообмен в зазоре между ротором и статором	$\mathrm{Nu} = 0{,}082 Ta^{0,665}$
Теплообмен в зазоре машин постоянного тока и синхронных машин при Re = $2{,}5\cdot10^3 \ldots 1{,}5\cdot10^4$; $\mathrm{Re} = \mathrm{Re}_\omega \sqrt{A^2 + (\mathrm{Re}/\mathrm{Re}_\omega)^2}$; $A = 0{,}54(\delta / r_1)^{0,32}$; $k_T = 1$ при вытяжной, $k_T = 1{,}7$ при нагнетательной вентиляции	$\mathrm{Nu} = 0{,}015 \mathrm{Re}^{0,8} k_T^{0,4} \times \left\{ \frac{1}{\left[1 + A^2 (\mathrm{Re}_\omega / \mathrm{Re})^2\right]^{0,4}} + \frac{3{,}06 (\delta / r_1)^{0,7}}{\left[A^2 + (\mathrm{Re}/\mathrm{Re}_\omega)^2\right]^{0,4}} \right\}$
Теплообмен обдуваемых ребристых станин при $\mathrm{Re}_{эф} = \sqrt{\omega_{вх}^2 + (0{,}5 v_в)^2}$, где $\omega_{вх}$ — расходная скорость воздуха на входе в канал; $v_в$ — окружная скорость вентилятора. Высота оси вращения $h = 70 \ldots 100$ мм	$\mathrm{Nu}_{\text{вх}} = 0{,}627 \mathrm{Re}_{эф}^{0,52}$; $\mathrm{Re}_{\text{эф}} = (0{,}2 \div 3) \cdot 10^4$

Теплообмен внутренних поверхностей станины и щитов асинхронных машин при $h = 160...250$ мм; D_a и D_i — внешний и внутренний диаметры сердечника статора; $\mathrm{Re}_c = vD_a / 2\nu$	$\mathrm{Nu}_{c.вT} = 3\,\mathrm{Re}_c^{0,495} \ln \frac{1,3D_i}{D_a - D_i}$
Теплообмен на поверхности якоря и катушек возбуждения машин постоянного тока, где v_a — окружная скорость якоря	$a = 1,4(1 + 0,8\sqrt{v_a})$
Теплообмен на поверхности коллектора и контактных колец, где $k = 0,7$ без обдува поверхности коллектора, $k = 1...1,3$ при интенсивном обдуве поверхности коллектора; $v_в$ — окружная скорость коллектора	$a = 50(1 + k\sqrt{v_k})$
Теплообмен на обдуваемых поверхностях станин и подшипниковых щитов, лакированных медных поверхностях (усредненные значения коэффициента теплоотдачи $k_0 = 0,1$ — для поверхностей ротора; для поверхностей лобовых частей и статорных обмоток $k_0 = 0,07...0,05$)	$a = 13,5(1 + k_0 v_в)$
теплопередача через оребренную стенку. E — коэффициент эффективности ребра, где l и δ_p — длина и толщина ребра; λ_p — теплопроводность материала ребра; a_2 — коэффициент теплоотдачи на оребренной поверхности	$E = \dfrac{th\left(\dfrac{1}{\delta_p}\sqrt{2\dfrac{a_2\delta_p}{\lambda_p}}\right)}{\dfrac{1}{\delta_p}\sqrt{2\dfrac{a_2\delta_p}{\lambda_p}}}$

При определении установившейся температуры рассматриваемой части машины необходимо учесть подогрев воздуха, обдувающего поверхность. Полный подогрев охлаждающего воздуха

$$\Delta\vartheta_в = Q_п / (c_в V), \qquad (7.28)$$

где $c_в = 1100$ Дж/(°С· м³) — удельная теплоемкость воздуха; V — необходимое количество охлаждающего воздуха, м³/с.

Принимая линейный характер изменения нагрева воздуха вдоль пути его движения, считают, что среднее превышение его температуры над температурой входящего холодного воздуха $\vartheta_{хол}$ равно примерно $0,5\Delta\vartheta_в$. В итоге средняя установившаяся температура обмотки электрической машины включает перепад температуры в изоляции $\Delta\vartheta_{из}$, превышение температуры охлаждаемой поверхности $\Delta\vartheta_п$ и среднее превышение температуры воздуха $0,5\Delta\vartheta_в$:

$$\vartheta = \Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_п + 0,5\Delta\vartheta_в + \vartheta_{охл}. \qquad (7.29)$$

7.5. МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ

Точное решение задачи определения температурных полей электрических машин возможно с применением численных методов расчета трехмерных полей. Однако на практике тепловые расчеты машин выполняют чаще всего с помощью

тепловых схем замещения. Этот метод можно рассматривать как приближенный для решения трехмерных задач. Он основан на аналогии тепловых и электрических потоков и тепловых и электрических сопротивлений. Эта аналогия вытекает из известных формул для элементарных участков тепловой и электрической цепи

$$\left.\begin{aligned} Q &= \lambda S \Delta \vartheta / \delta = \Delta \vartheta / R_T; \\ I &= S \Delta U / (\rho l) = \Delta U / R_Э. \end{aligned}\right\} \tag{7.30}$$

При теплоотдаче с поверхности твердого тела уравнение (7.30)

$$Q = \Delta \vartheta / R_a, \tag{7.31}$$

где $R_a = 1/\alpha S$; α — коэффициент теплоотдачи с поверхности охлаждения; S — площадь поверхности охлаждения.

Метод тепловых схем замещения может рассматриваться как метод конечных разностей, когда шаг сетки выбирают равным длине однородного участка тепловой схемы машины, и он становится соизмеримым с размерами отдельных элементов машины.

Для составления тепловой схемы замещения всю тепловую систему машины с непрерывно распределенными тепловыми источниками и тепловыми параметрами заменяют эквивалентной электрической схемой (сеткой), составленной из внутренних сопротивлений между узловыми точками R_λ и поверхностных сопротивлений R_a. Точность решения увеличивается при увеличении числа узловых точек тепловой схемы. При этом необходимо помнить, что точность теплового расчета определяется не только количеством узловых точек, но в большой степени зависит от точности определения коэффициентов теплоотдачи с поверхностей нагрева, теплопроводности выбранных материалов и других факторов, вносящих неопределенность в исходные данные. Поэтому часто для определения тепловой напряженности отдельных участков или всей машины используют упрощенные тепловые схемы замещения с мальм числом узловых точек.

Применение тепловых схем замещения дает возможность определять средние температуры частей электрической машины, принимаемых за однородные тела.

Рассмотрим построение тепловой схемы замещения на примере статора асинхронной машины. Тепловую схему статора можно разбить на три условно однородные в тепловом отношении части, являющиеся источником тепла и имеющие внутренние тепловые сопротивления: пазовую и две лобовые части обмотки статора с источниками тепловых потерь мощностью $P_п$ и $P_а$ и стальной сердечник с потерями $P_с$ (рис. 7.3). В каждой части машины выделяются потери, мощность которых определяют тепловые потоки. Считая в общем случае, что

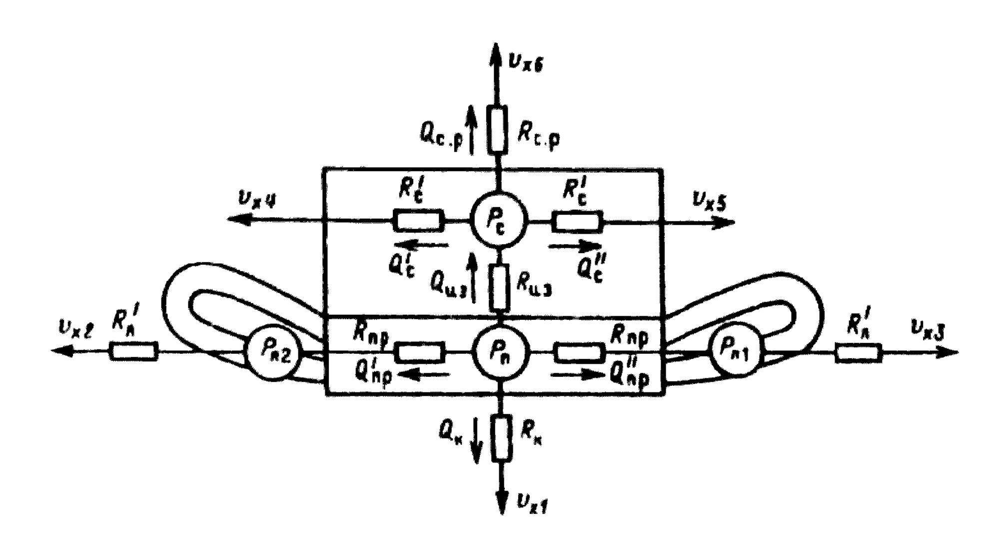


Рис. 7.3. Тепловая схема замещения статора

условия охлаждения рассматриваемых частей машины различны, принимаем четыре пути рассеяния тепловых потоков: тепловой поток к стенкам зубцов сердечника $Q_{из}$ с перепадом температуры в тепловом сопротивлении изоляции паза $R_{из}$; тепловой поток к охлаждающему воздуху в радиальных вентиляционных каналах $Q_к$ через тепловое сопротивление $R_к$; тепловые потоки от пазовых частей обмотки с перепадом температуры в тепловом сопротивлении обмоток вдоль проводников $R'_{пр}$; тепловые потоки лобовых частей $Q'_л$ и $Q''_л$ с тепловыми сопротивлениями $R'_л$; тепловые потоки с поверхностей статора $Q_с$, $Q''_с$ с перепадом температуры в тепловых сопротивлениях $R'_с$ и поток в радиальном направлении наружной поверхности ярма статора и внутренней поверхности статора $Q'_{с.р}$ с перепадом температуры в тепловом сопротивлении $R_{с.р}$.

Для расчета тепловой напряженности электрической машины и определения средних значений превышений температуры с отдельных частей принимают температуру охлаждающего воздуха у теплорассеивающих поверхностей одинаковой и равной средней температуре нагрева воздуха в объеме машины, в ряде случаев пренебрегают тепловым сопротивлением обмоток вдоль проводников. В этом случае тепловую схему машины сводят к упрощенной тепловой схеме замещения (рис. 7.4).

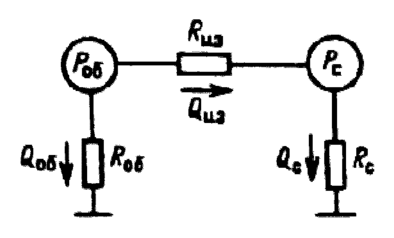


Рис. 7.4. Упрощенная тепловая схема замещения машины

Расчет тепловых сопротивлений элементов схемы замещения выполняют по формулам тепловых сопротивлений, приведенным в табл. 7.4, которые являются усредненными и при тепловых расчетах могут дать превышения температуры с большими отклонениями от

действительно наблюдаемых. Более точные значения тепловых сопротивлений получают в результате тепловых испытаний на моделях или натурных образцах конкретных типов машин (см. главы 9—11).

Таблица 7.4. **Тепловые элементы схемы замещения**

Элементы электрической машины	Формула теплового сопротивления
Электрическая изоляция пазовой части всыпной обмотки: $П$ — периметр поверхности охлаждения паза; l — длина пакета статора; $l_{ср}$ — длина витка обмотки статора; $b_{из}$ — толщина изоляции; $\lambda_{экв}$ — теплопроводность изоляции в пазу; $b_{п\,ср}$ — средняя ширина паза; $\lambda'_{экв}$ — эквивалентная теплопроводность внутренней изоляции катушки из круглого провода; k_{ϑ} учитывает увеличение сопротивления материала обмотки при увеличении температуры	$R_{и}=\frac{k_{\vartheta}2l/l_{ср}}{ZlП}\left(\frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}+\frac{b_{п.ср}}{8\lambda'_{экв}}\right)$
Лобовые части обмотки статора: l_1 — длина лобовой части; $b_{из\,л}$ — толщина изоляции лобовой части; $П_{л}$ — периметр секции обмотки в лобовой части; $h_{п}$ — высота паза	$R_{л}=\frac{k_{\vartheta}(2l_{л}/l_{ср})}{2ZП_{л}l_{л}}\times\left(\frac{b_{из.л}}{\lambda_{экв}}+\frac{h_{п}}{12\lambda'_{экв}}\right)$
Электрическая изоляция обмотки якоря машины постоянного тока со всыпной обмоткой: обозначения согласно п. 1; r_1, r_2 — размеры паза	$R_{из}=\frac{2l/l_{ср}}{ZlП}\left(\frac{r_1+r_2}{8\lambda'_{экв}}+\frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}\right)$
Сердечник якоря машины постоянного тока: D — расчетный диаметр якоря; $\sum P_{СТ}/P_{М}$ — отношение потерь стали к потерям в меди обмотки якоря; α коэффициент теплоотдачи с поверхности сердечника; $n_{к}$ — число и $d_{к}$ — диаметр аксиальных каналов	$R=\frac{2l/l_{ср}+\sum P_{СТ}/P_{М}}{(\pi D+n_{к}d_{к})\alpha l}$
Лобовые части обмотки якоря машины постоянного тока: обозначения согласно п. 1 и 2	$R_{из}=\frac{2l/l_{ср}}{2ZП_{л}l_{л}}\left(\frac{h_{п}}{8\lambda_{экв}}+\frac{b_{из}}{\lambda_{rd}}\right)$
Внешняя поверхность обмоток параллельного возбуждения и добавочных полюсов: $k=0{,}9$ (IP22), $k=0{,}7$ (IP44), $k=0{,}6$ (IP44, IC0141), $S=l_{ср}П$ — условная поверхность охлаждения катушки; α — коэффициент теплоотдачи с поверхности катушки	$R=\frac{k}{2pS\alpha}$
Внешняя поверхность коллектора машины постоянного тока: $S_{к}$ — условная поверхность охлаждения коллектора, $\alpha_{к}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности коллектора	$R=\frac{1}{S_{к}\alpha_{к}}$
Воздушный зазор асинхронной машины: $\alpha'_{\delta}=\frac{Nu\lambda_{в}}{\delta}$; $Nu=\frac{0{,}212f\,\mathrm{Re}}{1\ \ 3{,}81/f\,\mathrm{Re}}$; $f=\frac{1}{4(1{,}11+2\lg\delta/e)^2}$, где $e=0{,}08...0{,}1$ мм; S_{δ} теплопередающая поверхность воздушного зазора; $\mathrm{Re}=\omega D\delta/2v$	$R=\frac{1}{\alpha'_{\delta}S_{\delta}}$
Ярмо магнитопровода статора h_j: S_j — высота и площадь наружной поверхности ярма статора	$R=\frac{h_j}{\lambda_c S_j}$

Пакет статора в поперечном направлении; $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи в радиальных вентиляционных каналах; S_q — боковая теплорассеивающая поверхность всех пакетов статора: $S_q = \pi(D_a - h_j)(n_к + 1)$, где $n_к$ — числа вентиляционных каналов; λ_q — теплопроводность пакета статора в поперечном направлении	$R = \frac{1}{\alpha_{кT} S_q} + \frac{h_{cT}}{\lambda_q S_q}$
Внутренняя поверхность корпуса закрытой машины: $\alpha = 15[1 + (0{,}05...0{,}07v)]$; v — скорость обдува внутренней поверхности; $S_{внт}$ — полная внутренняя поверхность корпуса	$R = \frac{1}{\alpha S_{внт}}$
Внешняя поверхность корпуса станины: $S_{1к}$ $S_{3к}$ — площади оребренной поверхности, боковой поверхности со стороны вентилятора и поверхности щита со стороны вала соответственно; коэффициенты теплоотдачи $a_{1к}$ $a_{3к}$ определяются типом и исполнением машины	$R - \frac{1}{a_{1к} S_{1к} + a_{2к} S_{2к} + a_{3к} S_{3к}}$

7.6. ВЕНТИЛЯЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

При вентиляционном расчете машины определяют количество воздуха, которое необходимо ежесекундно прогонять через машину, и давление (напор), обеспечивающее прохождение требуемого количества охлаждающего агента. Одновременно вентиляционный расчет проводится в целях определения рациональной схемы вентиляции, при которой количество охлаждающего воздуха, омывающего рассматриваемую поверхность, не должно быть чрезмерным, а должно соответствовать количеству снимаемого с поверхности тепла и обеспечивать заданный уровень превышения температуры обмоток машины. При расчетах считают, что воздушный поток обычно отводит все тепло машины, за исключением механических потерь в подшипниках и наружном вентиляторе.

Количество воздуха (м^3), необходимое для охлаждения машины при рациональной схеме вентиляции (когда превышения температуры воздуха на пути всех струй и каналов внутри машины одинаковы):

$$V_в = \sum P_в / (c_в \Delta \vartheta_в), \tag{7.32}$$

где $\sum P_в$ потери, отводимые воздухом, Вт; $c_в = 1100$ Дж/(° С·м^3) – удельная теплоемкость воздуха; $\Delta\vartheta_в = \vartheta_г - \vartheta_{хол}$ – превышение температуры воздуха, ° С; $\vartheta_г$ температура горячего воздуха, ° С; $\vartheta_{хол}$ температура холодного воздуха, ° С. Значение подогрева воздуха $\vartheta_в$, может быть принято равным 20° С для машин с изоляцией классов нагревостойкости А, Е, В, до ° С — для изоляции классов

нагревостойкости F и H, 25° C — для турбо- и гидрогенераторов.

При составлении расчетной схемы вентиляционная (гидравлическая) цепь системы охлаждения разбивается на большое число элементарных условно однородных участков, которые соединяются между собой как последовательно, так и параллельно.

Аэродинамическое сопротивление отдельного *i*-го участка системы определяют как отношение между массовым расходом V_i охлаждающей среды в заданном канале и потерями давления на рассматриваемом участке. Здесь также может быть проведена аналогия между гидравлическими и электрическими цепями.

Для определения необходимого давления вентилятора *H* требуется рассчитать постоянную *Z,* которую в дальнейшем будем изнывать аэродинамическим сопротивлением. Для отдельного участка

$$Z_i = H_i / V_i^2, \qquad (7.33)$$

или

$$Z_i = \xi /(2\rho S^2), \qquad (7.34)$$

где ξ — коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ — плотность охлаждающей среды; S — сечение канала.

Расчет сопротивления Z_i, проводят с использованием опытных значений коэффициентов ξ, (табл. 7.5).

Таблица 7.5. **Значение опытных коэффициентов** ξ

Форма участка канала	Коэффициент сопротивления ξ
Вход в круглые отверстия каналов с выступающими краями	0,6
Вход в круглые отверстия каналов с прямоугольными краями	0,3
Вход в круглые отверстия каналов с закругленными краями или через проволочную сетку	0,125
Внезапное расширение канала сечением $S_{\min}$ до сечения $S_{\max}$	$0{,}6\left(1-\frac{S_{\min}}{S_{\max}}\right)^2$
Внезапное сужение канала сечением $S_{\max}$ до сечения $S_{\min}$	$0{,}35\left(1-\frac{S_{\min}}{S_{\max}}\right)^2$
Изгиб вентиляционного канала на угол α	$\frac{0{,}7}{90}\alpha$

Вентиляционный расчет на базе этих коэффициентов хотя и является приближенным, но дает возможность оценить требования, предъявляемые к вентиляционной системе, и позволяет правильно выбрать размеры и конфигурацию вентиляционных каналов.

Для круглых каналов значение коэффициента аэродинамического сопротивления от трения воздуха, Па·с^2/м^2, можно рассчитать по формуле

$$\xi_{\text{тр}} = 0{,}6\lambda\frac{1}{d}, \tag{7.35}$$

где λ — коэффициент трения о стенки канала; l и d — длина и диаметр канала.

Для расчета трения в аксиальных каналах электрических машин принять $\lambda = 0{,}08$. В этом случае расчетная формула для коэффициента $\xi_{\text{тр}}$ принимает следующий вид:

$$\xi_{\text{тр}} = 0{,}05\frac{l}{d}. \tag{7.36}$$

Если канал имеет прямоугольное сечение, то вместо d следует ввести эквивалентный диаметр

$$d_{э} = 2ab/(a+b), \tag{7.37}$$

где a и b размеры сторон прямоугольного канала.

Для каналов произвольного сечения можно принять в качестве эквивалентного размера диаметр круга, равного по площади рассматриваемому сечению.

Потери давления, Па, от трения воздуха в канале

$$H_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}}v^2, \tag{7.38}$$

где v — скорость воздуха в канале, м/с.

Расчет аэродинамического сопротивления лобовых частей обмоток имеет свои особенности, определяемые исполнением обмотки отношением ширины воздушного промежутка между секциями шагу по середине пазов $b/b_{\text{п.ср}}$. При этом вводится коэффициент k, учитывающий увеличение аэродинамического сопротивления. Это коэффициент для машин различной мощности и исполнений мо изменяться в пределах 4,7—1,7.

Для вентиляционного расчета необходимо иметь чертежи машины и знать все размеры каналов вентиляционной системы, характеристики воздухопроводов, коэффициенты аэродинамического противления.

Любая сложная система вентиляции может рассматриваться как цепь последовательно и параллельно включенных вентиляционных каналов. При последовательном соединении n участков вентиляционной схемы расход воздуха V на всех участках постоянный, потеря давления равна $H_{ab} = \sum H_j$, поэтому аэродинамическое сопротивление от входа a до выхода b равно

$$Z_{ab} = \sum_{i=1}^{n} Z_i. \tag{7.39}$$

При параллельном соединении n участков потери давления на всех участках определяются разностью давлений в начале и в конце участка ab, а общий расход для всей цепи, состоящий из n параллельно соединенных каналов, равен:

$$V = \sqrt{\Delta H_{ab} / Z_{\Sigma}} . \tag{7.40}$$

Аэродинамическое сопротивление участка ab

$$Z_{ab} = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\sqrt{Z_i}} \right)^{-2} . \tag{7.41}$$

Вентиляционные схемы сложных систем охлаждения рассчитываются на ЭВМ с использованием известных методов расчета электрических цепей.

В основу метода расчета вентиляционных и гидравлических цепей на ЭВМ положена система уравнений, составленная для всех узлов и контуров вентиляционной схемы по аналогии с первым и вторым законами Кирхгофа: $\sum V = 0$, т. е. во всех узлах алгебраическая сумма расходов равна нулю, и $\sum H_i + \sum \Delta H_i = 0$, т. е. сумма напоров вентиляторов и потерь давления всех ветвей для любого замкнутого контура равна нулю.

Конечным результатом вентиляционного или гидравлического расчета систем охлаждения является определение номинального напора вентилятора или нагнетательного устройства, обеспечивающего номинальный расход охлаждающей среды $V_{ном}$ при расчетном суммарном сопротивлении всей схемы охлаждения Z_{Σ}:

$$H_{ном} = Z_{\Sigma} V_{ном}^2 . \tag{7.42}$$

В [16] приводятся эмпирические зависимости, позволяющие приближенно рассчитать параметры нагнетательных элементов и расход V, м^3/с:

$$V_в = m(n_к l_к + 100) \frac{n}{1000} \left(\frac{D_{вн}}{100} \right) \cdot 10^{-4} , \tag{7.43}$$

где при $2p = 2$, $m = 2{,}6$, а при $2p = 4{,}6{,}8{,}10$ — $m = 3{,}15$; $n_к, l_к$ — число и длина радиальных вентиляционных каналов (при их отсутствии $n_к l_к = 0$); $D_{вн}$ — внешний диаметр машины. Полученное по (7.43) значение V должно быть не менее рассчитанного по (7.32). Давление, Па,

$$H = 7{,}85 (n / 1000)^2 (D_{вн} / 100)^2 . \tag{7.44}$$

Для двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 с наружным обдувом центробежным вентилятором необходимое количество воздуха определяют по формуле

$$V_в = \frac{\sum P m \sqrt{(n / 1000)(D_{вн} / 100)}}{1100 \Delta \vartheta_в} , \tag{7.45}$$

где $\Delta\vartheta_в$ — превышение температуры воздуха; $\sqrt{(n/1000)(D_{вн}/100)}$ — коэффициент, учитывающий изменение условий теплоотдачи по длине корпуса. Значение m определяется по следующей таблице:

h, мм	$2p$	m
56…132	2	2,6
56…132	4; 6; 8	1,8
160…400	2	3,3
160…400	4; 6; 8; 10; 12	2,5

Превышение температуры $\Delta\vartheta_в$, определяется по формуле

$$\Delta\vartheta_в = \sum P'/(S_{ДВ}\alpha), \qquad (7.46)$$

где $\sum P'$ — сумма всех потерь, выделяемых во внутреннем объеме машины при предельной допускаемой температуре; $S_{ДВ}$ — внутренняя теплопередающая поверхность двигателя; α — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности двигателя.

Расход охлаждающего воздуха (м^3/с) двигателей со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 можно определить по формуле

$$V_в = 0{,}6\frac{n}{1000}\left(\frac{D_{вн}}{100}\right)^3 \cdot 10^{-2}. \qquad (7.47)$$

Напор вентилятора, Па,

$$H_в = 12{,}3(n/1000)^2(D_{вн}/100)^2. \qquad (7.48)$$

Для оценки вентиляции и других двигателей с аксиальной вентиляцией используют зависимости, построенные на основе обобщения данных вентиляционных систем выпускаемых электрических машин.

С достаточной точностью сопротивление Z вентиляционной системы машины можно принять по рис. 7.5, а площади сечения входа $S_{вх}$ и выхода $S_{вых}$ каналов вентиляционного тракта машины — по рис. 7.6.

7.7. РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Встроенный вентилятор, укрепленный на валу электрической машины, должен создавать напор, достаточный для того, чтобы обеспечить необходимый расход охлаждающей среды в каналах вентиляционной системы машины. Вентиляторы проектируются с учетом особенностей конструктивного исполнения конкретного типа машины [16].

Ниже приводится упрощенный метод поверочного расчета встроенного вентилятора, основанный на данных серийных машин общего назначения. В таких машинах используют преимущественно центробежные вентиляторы с

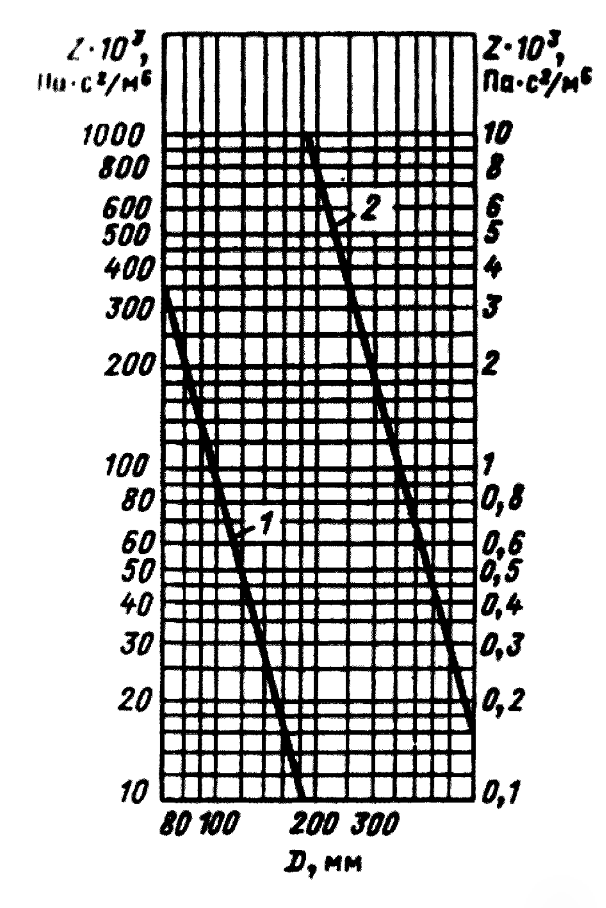


Рис. 7.5. Зависимость среднего значения аэродинамического сопротивления машины от диаметра якоря:
1 — якоря без аксиальных вентиляционных каналов;
2 — то же, с аксиальными каналами

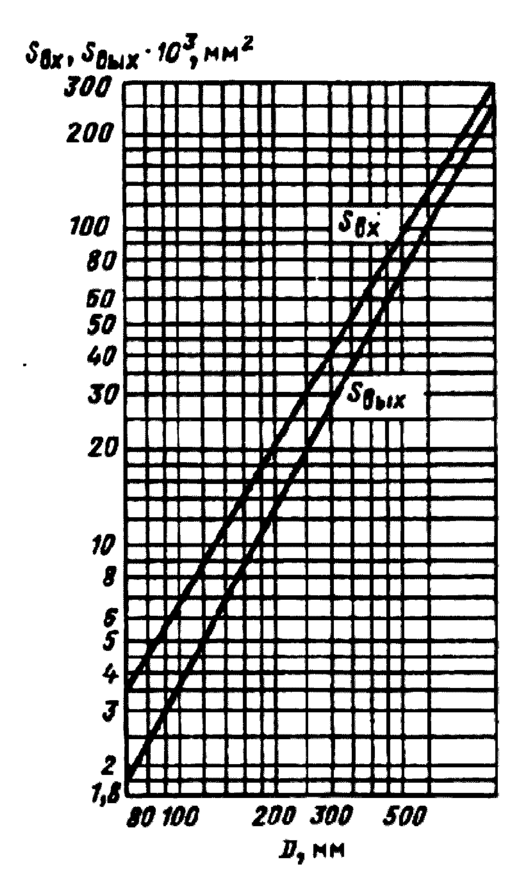


Рис. 7.6. Зависимость $S_{вх}$ и $S_{вых}$ от диаметра якоря

радиальными лопатками, рабочее колесо которых изменяет свое направление потока на радиальное.

Внешний диаметр вентиляторного колеса выбирают в соответствии с типом вентиляционной системы и конструкции машины. При аксиальной вентиляции внешний диаметр рабочего колеса D_2 (рис. 7.7) выбирают максимально возможным.

По выбранному внешнему диаметру вентилятора определяют окружную скорость, м/с:

$$v_2 = (\pi D_2 n)/60\,. \qquad (7.49)$$

Максимальное значение КПД вентилятора приблизительно соответствует режиму, когда номинальное давление вентилятора $H_{ном} = 0{,}75H_0$,

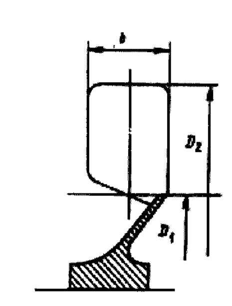


Рис. 7.7. Колесо вентилятора

где H_0 — давление, развиваемое вентилятором в режиме холостого хода, т. е. при закрытых отверстиях по внешнему диаметру, когда расход воздуха равен нулю. Номинальное значение расхода приблизительно равно:

$$V_{ном} \approx V_{\max} / 2,$$

где $V_{\max}$ — расход вентилятора, м^3/с, работающего в режиме короткого замыкания (по аналогии с электрической цепью), т. е. в открытом пространстве.

Из условия максимального КПД принимается

$$V_{\max} = 2V_{ном}. \qquad (7.50)$$

Сечение на выходной кромке вентилятора, м^2,

$$S_2 = \frac{V_{\max} 60}{0{,}42\pi D^2 n}, \qquad (7.51)$$

где 0,42 — номинальный КПД радиального вентилятора.

Ширина колеса вентилятора

$$b = S_2 / (0{,}92\pi D_2), \qquad (7.52)$$

где 0,92 — коэффициент, учитывающий наличие вентиляционных лопаток на поверхности вентиляционной решетки (поверхности S_2).

Внутренний диаметр колеса D_1 определяют из условия, что вентилятор работает при максимальном значении КПД, т. е. при $V = 0{,}5V_{\max}$ и $H = 0{,}75H_0$. Используя уравнения статического давления, развиваемого вентилятором, Па, найдем давление, развиваемое вентилятором при холостом ходе:

$$H_0 = \eta_a \rho (v_2^2 - v_1^2), \qquad (7.53)$$

где $\eta_a = 0{,}6$ для радиальных лопаток; $\rho = 1{,}2$ кг/м^3 — плотность воздуха.

Зная расход воздуха V, сопротивление вентиляционной системы Z и определив окружную скорость на внутренней кромке вентилятора [16]:

$$v_1 = \sqrt{v_2^2 - \frac{ZV^2}{0{,}75\rho n_a}}, \qquad (7.54)$$

найдем внутренний диаметр колеса вентилятора, м:

$$D_1 = 60\frac{v_1}{\pi n}. \qquad (7.55)$$

Во встроенных вентиляторах отношение D_2 / D_1 лежит в пределах 1,2…1,5.

Число лопаток вентилятора принимают [16]:

$$N_л = (6...10)\frac{D_2}{D_2 - D_1}. \qquad (7.56)$$

Для уменьшения вентиляционного шума рекомендуется выбирать число лопаток вентилятора таким, чтобы оно равнялось нечетному числу. При вытяжной вентиляции могут быть рекомендованы и числа зависимости от диаметра вентилятора: при $D_2 = 200$ мм $N_л = 13$, при $D_2 = 250$ мм $N_л = 17$, при $D_2 = 300$ мм $N_л = 23$, при $D_2 = 350$ мм $N_л = 29$.

Для вентиляторов асинхронных двигателей серии 4А рекомендуется выбирать число лопаток согласно табл. 7.6.

Таблица 7.6. **Число лопаток вентилятора**

Высота оси вращения, мм	Число лопаток при	
	$2p = 2$	$2p = 4,6,8$
50…63	4	4
71…100	10	10
112…132	5	8
160…250		9
280…355	6	

Число лопаток вентиляторов машин постоянного тока выбирают ориентировочно:

$$N_л = D_2 / 20. \qquad (7.57)$$

Значение $N_л$ округляют до ближайшего простого числа.

После расчета вентилятора необходимо уточнить результаты вентиляционного расчета.

Для определения действительного расхода воздуха $V_в$ и давления $H_в$ и строят совмещенные характеристики вентилятора и вентиляционного тракта машины. Характеристика вентилятора может быть выражена с достаточной точностью уравнением

$$H = H_0 \left[1 - (V_в / V_{max})^2\right]. \qquad (7.58)$$

Характеристика вентиляционного тракта согласно (7.50)

$$H = ZV^2. \qquad (7.59)$$

На рис. 7.8 представлены графики, построенные по уравнениям (7.58) (кривая *1*) и (7.59) (кривая *2*). Координата точки пересечения этих характеристик определяется путем решения уравнений

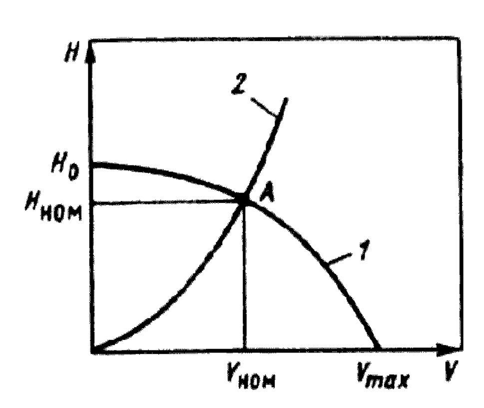


Рис. 7.8. Характеристики вентилятора

$$\left.\begin{aligned} H_{ном} &= H_0 Z V_{\max}^2 / (H_0 + Z V_{\max}^2); \\ V_{ном} &= V_{\max} \sqrt{H_0 / (H_0 + Z V_{\max}^2)}. \end{aligned}\right\} \quad (7.60)$$

Мощность, потребляемая вентилятором, Вт,

$$P_в = (H_{ном} V_{ном}) / \eta_э, \quad (7.61)$$

где $\eta_э$ — энергетический КПД вентилятора, который может быть принят равным примерно

$$\eta_э \approx 0{,}19 \sin \pi \left(\frac{V_{ном}}{V_{\max}} \right). \quad (7.62)$$

Вентиляционный расчет электрической машины при курсовом проектировании проводится по упрощенной методике. Более подробные расчеты отдельных видов исполнения машин приводятся в гл. 9—11.

Глава восьмая. **Элементы конструкции и механические расчеты**

Наряду с электромагнитными и тепловыми расчетами, механические расчеты во многом определяют энергетические, массогабаритные и виброакустические показатели, а также надежность и срок службы электрических машин. Поэтому расчеты узлов и отдельных деталей при проектировании электрических машин имеют важное значение.

8.1. МАГНИТОПРОВОД СТАТОРА

Магнитопроводы статора машин переменного тока общего назначения выполняют шихтованными из электротехнической стали толщиной 0,35...0,55 мм. При внешнем диаметре магнитопровода до 990 мм он выполняется из целых листов (рис. 8.1), а при больших диаметрах собирают из отдельных сегментов (см. рис. 10.14). По внутренней поверхности магнитопровода штампуют пазы требуемой формы для размещения в них обмотки статора. Так как в размерах отдельных зубцов имеется разброс, обусловленный допусками при изготовлении штампа, то при шихтовке магнитопровода листы укладываются в одно и то же положение относительно друг друга по шихтовочному знаку *А,* который вырубают на внешней поверхности. Для изоляции листов друг от друга их после снятия заусенцев лакируют. Если листы изготовляют из стали 2013, то их подвергают термообработке, в результате которой уменьшаются потери в стали и на поверхности создается оксидный и изоляционный слой.

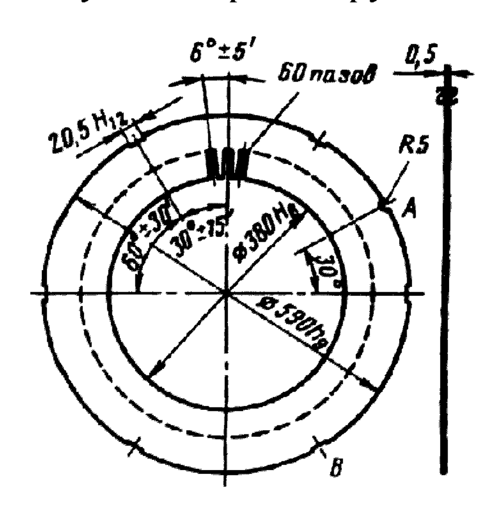


Рис. 8.1. Периметр чертежа листа статора

При большой длине магнитопровода его делят на пакеты, между которыми выполняют вентиляционные радиальные каналы шириной 10 мм путем приварки к крайним листам пакета распорок (рис. 8.2), имеющие чаще всего двутавровое сечение.

При внешнем диаметре до 452…493 мм магнитопровода набирают из целых листов,

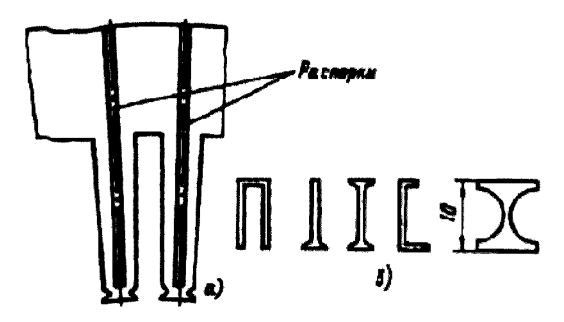


Рис. 8.2. Крайний лист магнитопровода статора с приваренными к нему распорками (*а*) и формы распорок (*б*)

насаживая их на цилиндрическую оправку диаметром, равным внутреннему диаметру статора. Для предотвращения деформации (распушения) относительно тонких зубцов торцевые листы магнитопровода штампуют из более толстых листов или их попарно сваривают точечной сваркой. Собранный таким образом магнитопровод прессуют и после этого скрепляют по внешнему диаметру П-образными скобами (рис. 8.3). Скобы приваривают к торцам и к внешней поверхности магнитопровода или, как это сделано у машин серии 4А, укладывают в специальные канавки *В* (см. рис. 8.1) в форме ласточкина хвоста на внешней поверхности магнитопровода. После укладки обмотки и пропитки ее лаком магнитопровод запрессовывают в станину и закрепляют стопорными винтами.

Иногда в асинхронных машинах небольших габаритов (h<63 мм) спрессованный магнитопровод покрывают тонкостенной оболочкой из алюминия или алюминиевого сплава (рис. 8.4). Эта оболочка охватывает внешнюю и частично торцевые поверхности магнитопровода. Она скрепляет пакет и заменяет собой станину. Оболочка выполняется в формах на специальных машинах для литья под давлением. Такое изготовление статора экономически более выгодно по сравнению с изготовлением его с чугунной станиной.

При внешних диаметрах магнитопровода 520...990 мм он собирается из листов, которые укладываются в расточенный корпус или на обработанные

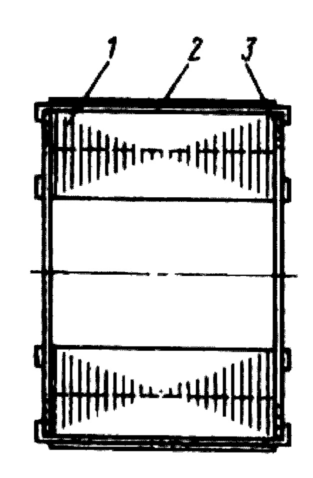


Рис. 8.3. Магнитопровод статора, стянутый скобами:
1 — магнитопровод; *2* — скоба; *3* — нажимная шайба

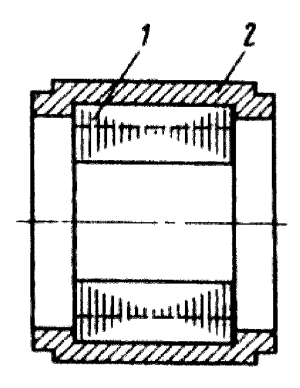


Рис. 8.4. Магнитопровод статора, залитый в оболочку:
1 — магнитопровод; *2* — оболочка (корпус)

ребра (рис. 8.5). Магнитопровод скреплен двумя нажимными шайбами (кольцами). Для создания осевого сжатия у одного края ребра имеется выступ, а у другого края — канавка, в которую вставляется запорная шпонка. Нажимная шайба передает усилие сжатия на магнитопровод через нажимные пальцы — стальные пластинки, приваренные к крайним листам.

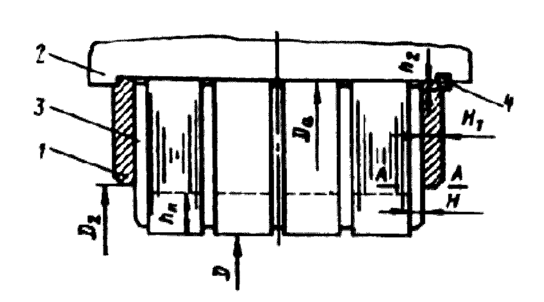


Рис. 8.5. Магнитопровод статора, запрессованный нажимными шайбами:
1 — нажимная шайба; *2* — ребро станины;
3 — нажимные пальцы; *4* — запорная шпонка

При внешних диаметрах магнитопровода более 990 мм он собирается из сегментов. Различают слоевую шихтовку, при которой каждый слой состоит из целого числа сегментов, и винтовую, при которой в каждом слое последний сегмент перекрывает предыдущий.

Для шихтовки магнитопровода из сегментов существуют несколько способов крепления листов в корпусе. В машинах общего назначения наибольшее распространение находит способ крепления на сборочных шпильках 5, которые одновременно являются и стяжными (рис. 8.6). Базирование магнитопровода в радиальном направлении происходит на ребрах станины 1.

При механическом расчете магнитопровода проверяют прочность стягивающих его узлов.

При запрессовке магнитопровода шайбами проверяют прочность этих шайб, нажимных пальцев и шпонки. При стяжке магнитопровода шпильками выбирают их размер и число. При расчете исходят из того, что давление в запрессованном магнитопроводе q_c находится в пределах $7 \cdot 10^5 ... 10^6$ Па.

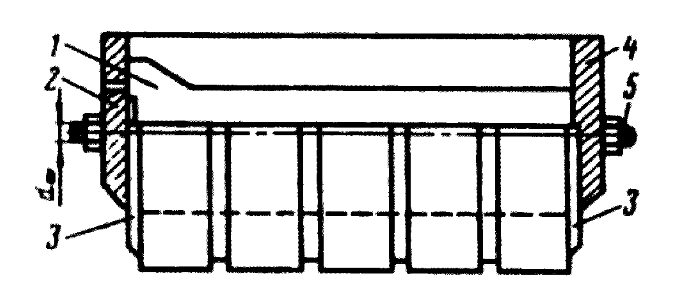


Рис. 8.6. Магнитопровод статора, стянутый шпильками:
1 — ребро станины; *2* — нажимное кольцо; *3* — нажимные пальцы; *4* — «глухая» стенка станины;
5 — сборочные шпильки

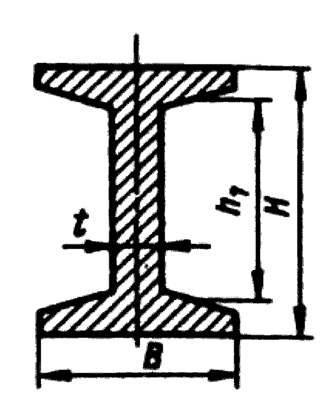


Рис. 8.7. размеры двутаврового сечения нажимного пальца

Принимают, что образование веера в торцах зубцового слоя не снижает давление и реакции запрессовки. Такое допущение упрощает расчетные формулы.

Расчет нажимных шайб, пальцев и шпонок. На нажимные пальцы и шайбу действует изгибающий момент, созданный равномерным давлением спрессованного магнитопровода.

Полное усилие запрессовки, Н,

$$Q_з = q_c(T_{c1}D_a^2 - S_п), \tag{8.1}$$

где T_{c1} — коэффициент, который определяется в зависимости от $a = D / D_a$ (см. рис. 8.5): $T_{c1} = 0{,}785(1 - a^2)$; $S_п$ — площадь сечения всех пазов статора, м^2; D_a — внешний диаметр магнитопровода статора, м.

Диаметр равнодействующей усилия запрессовки, м,

$$D_p = \frac{T_2 D_a^3 - S_п(D + h_п)}{T_{c1}D_a^2 - S_п}, \tag{8.2}$$

где $T_2 = 0{,}524(1 - a^3)$ — коэффициент; $h_п$ — высота паза, м.

Момент, изгибающий нажимную шайбу, Н·м,

$$M_1 = Q_з(D_a - D_р)/2. \tag{8.3}$$

Напряжение изгиба, Па,

$$\sigma_1 = \frac{6M_1}{\pi\left(\frac{D_a + D_2}{2}\right)H_1^2}, \tag{8.4}$$

где D_a, D_2, H_1 — в м (см. рис. 8.5).

Допустимое напряжение ограничено условием необходимой жесткости нажимной шайбы. Для стали марки Ст3 $\sigma_{доп} = 600 \cdot 10^5$ Па.

Изгибающий момент, действующий на нажимные пальцы крайних листов сердечника в сечении A—A (см. рис. 8.5), Н·м,

$$M_2 = \frac{q_c}{Z_1}\left[\left(\frac{D_2}{10}\right)^3 T_3 - \frac{S_п}{2}(D_2 - D - h_п)\right], \tag{8.5}$$

где $T_3 = 131(1 - a_1)^2(1 + 2a_1); a_1 = D / D_2, Z_1$ — число пазов.

Напряжение изгиба пальцев, Па:

При двутавровом сечении пальца (рис. 8.7)

$$\sigma_2 = 6HM_2 /(BH^3 - b_1 h_1^3), \tag{8.6}$$

где $B, H, h_1 b_1 = B - t$ — размеры в метрах по рис. 8.7;

при прямоугольном сечении пальца

$$\sigma_2' = 6M_2 /(BH^2). \tag{8.7}$$

Допустимое напряжение для пальцев из стали марки Ст3 равно 1600×10^5 Па.

Напряжение смятия шпонки, Па,

$$\sigma_{см} = Q_3 /(mb_2 h_2), \qquad (8.8)$$

где m — число шпонок; b_2, h_2 — размеры контактной поверхности одной шпонки, м.

Допустимое напряжение $\sigma_{см} = 1500\cdot 10^5$ Па.

Пример. Исходные данные: синхронный двигатель $P_{ном} = 200$ кВт, $D_a = 74\cdot 10^{-2}$ м, $D = 54\cdot 10^{\ 2}$ м, $D_2 = 65{,}4\cdot 10^{\ 2}$ м, $Z_1 = 72$, $h_п = 4{,}65\cdot 10^{-2}$ м, $b_п = 1{,}23\cdot 10^{-2}$ м. Размеры пальца: $H = 1{,}054\cdot 10^{\ 2}$ м, $B = 0{,}6\cdot 10^{\ 2}$м. Контактная поверхность шпонки $b_2\cdot h_2 = 4\cdot 10^{\ 2}\cdot 0{,}5\cdot 10^{\ 2}$ м^2, для шайбы $H_1 = 1{,}7\cdot 10^{\ 2}$ м, число шпонок $m = 6$,

$a = 54 / 74 = 0{,}73$, $T_{c1} = 0{,}785(1 - 0{,}73^2) = 0{,}37$.

Площадь сечения всех пазов статора $S_п = 72\cdot 1{,}23\cdot 10^{-2}\cdot 4{,}65\cdot 10^{-2} = 412\cdot 10^{-4}$ м^2.

Усилие запрессовки по (8.1)

$Q_з = 8\cdot 10^5 (0{,}37\cdot 74^2\cdot 10^{-4} - 412\cdot 10^{-4}) = 12{,}91\cdot 10^4$ Н.

Из (8.2)

$$D_p = \frac{0{,}32\cdot 74^3\cdot 10^{-6} - 412\cdot 10^{-4}(54 + 4{,}65)\cdot 10^{-2}}{0{,}37\cdot 74^2\cdot 10^{-4} - 412\cdot 10^{-4}} = 65{,}28\cdot 10^{-2} \text{ м;}$$

$T_2 = 0524(1 - 0{,}73^3) = 0{,}32$

Изгибающий момент по (8.3)

$$M_1 = \frac{12{,}91\cdot 10^4 (74 - 65{,}28)\cdot 10^{\ 2}}{2} = 59{,}29\cdot 10^2 \text{ Н·м.}$$

Напряжение изгиба по (8.4)

$$\sigma_1 = \frac{6\cdot 56.29\cdot 10^2}{\pi\left(\dfrac{74 + 65.4}{2}\right)\cdot 10^{-2}\cdot 1.7^2\cdot 10^{-4}} = 534\cdot 10^5 \text{ Па,}$$

где при $a_1 = D / D_2 = 54 / 65{,}4 = 0{,}826$ получаем $T_3 = 131(1 - 0{,}826)^2 (1 + 2\cdot 0{,}826) = 10{,}51$.

Из (8.5)

$$M_2 = \frac{8\cdot 10^5}{72}\left[\left(\frac{65{,}4}{10}\right)^3\cdot 10^6\cdot 10{,}51 - \frac{412\cdot 10^{-4}}{2}(65{,}4 - 54 - 4{,}65)\cdot 10^{-2}\right] = 17{,}22 \text{ Н·м}$$

Напряжение изгиба пальцев по (8.7)

$\sigma_2' = 6\cdot 17{,}22 /(0{,}6\cdot 1{,}05^2\cdot 10^{\ 6}) = 1562\cdot 10^5$ Па.

Напряжение смятия по (8.8)

$$\sigma_{см} = \frac{12{,}91\cdot 10^4}{6\cdot 4\cdot 10^{-2}\cdot 0{,}5\cdot 10^{-2}} = 1076\cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Расчет числа и диаметра шпилек. Расчет проводится по усилию запрессовки магнитопровода, определяемому по (8.1).

Число шпилек

$$m_ш \ge Q_з /(\sigma S_0), \qquad (8.9)$$

где $S_0 = \pi d_{0ш}^2 / 4$ — площадь сечения шпильки по нарезке, м^2; $d_{0ш}$ — внутренний диаметр резьбы шпильки, м.

Допустимое напряжение σ для шпилек из стали марки Ст3 равно $1600 \cdot 10^5$ Па. Нажимные пальцы рассчитываются так же, как и в предыдущем случае.

Пример. Синхронный двигатель: $D_a = 1{,}73$ м, $D = 1{,}2$ м, $Z_1 = 72, b_п = 1{,}87 \cdot 10^{-2}$ м, $h_п = 8{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $a = 1{,}20/1{,}73 = 0{,}69$, $T_{c1} = 0{,}785(1 - 0{,}69^2) = 0{,}41$.

Из (8.1)

$Q_з = 8 \cdot 10^5 (0{,}41 \cdot 1{,}73^2 - 72 \cdot 1{,}87 \cdot 10^{-2} \cdot 8{,}5 \cdot 10^{-2}) = 8{,}96 \cdot 10^5$ Н.

Выбираем шпильки М36 ($S_0 = 7{,}4 \cdot 10^{-4}$ м^2) из стали марки Ст3.

По (8.9)

$$m_ш \geq \frac{8{,}96 \cdot 10^5}{1600 \cdot 10^5 \cdot 7{,}4 \cdot 10^{-4}} = 7{,}56.$$

Выбираем 8 шпилек.

Бандажные кольца обмотки статора. При протекании ток по обмотке статора на ее лобовые части действуют электродинамические силы, которые стремятся отогнуть их к магнитопроводу. Особенно велики эти силы при внезапных коротких замыканиях, когда токи возрастают в несколько раз по сравнению с их номинальным значением. Для предупреждения отгиба лобовых частей применяется крепление их с помощью бандажных колец (рис. 8.8). Необходимость применения бандажных колец определяется вылетом лобовых частей L и высотой паза $h_п$. Если длина вылета при данной высоте паза лежит выше кривой (см. рис. 8.8), то установка бандажных колец необходима.

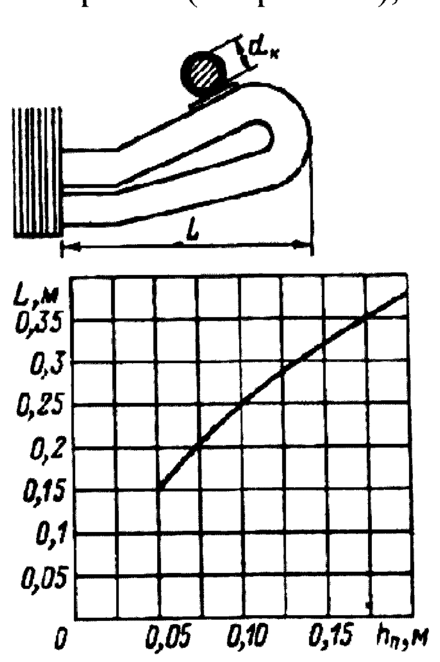


Рис. 8.8. к определению числа бандажных колец

Число колец $m_к$ определяется из следующего расчета: одно кольцо на каждые 100 мм вылета лобовой части сверх значения, ограниченного кривой на рис. 8.8.

Сечение колец выбирают по растягивающему усилию, испытываемому кольцом при внезапном коротком замыкании, Н,

$$Q_к = \frac{1{,}11}{m_к}\left(\frac{D}{2px_*}\right)^2 \cdot 10^4, \tag{8.10}$$

где D — внутренний диаметр магнитопровода, м; $2p$ — число полюсов; x_* — относительное переходное реактивное сопротивление обмотки статора (находится из электромагнитного расчета); для предварительных расчетов можно принять у синхронных явнополюсных машин $x_* = 0{,}2 - 0{,}3$, у короткозамкнутых

асинхронных двигателей $x_* = 0{,}15 - 0{,}25$, у асинхронных двигателей с фазным ротором $x_* = 0{,}25 - 0{,}4$.

Напряжение растяжки в кольце, Па,

$$\sigma = Q_к / S_к, \qquad (8.11)$$

где $S_к = \pi d_к^2 / 4; d_к$ — диаметр кольца, м.

Тогда

$$d_к = \sqrt{4Q_к/(\pi\sigma)}. \qquad (8.12)$$

При доброкачественной сварке кольца из стали марки Ст3 допустимое напряжение растяжения $\sigma = 1800 \cdot 10^5$ Па. Бандажные кольца изготавливают из прутков диаметрами 10, 12, 16, 20, 24 мм и прутков квадратного сечения 22×22 и 32×32 мм². В машинах с внешним диаметром магнитопровода статора более 1 м приваривают петли, которые крепят с помощью шпилек к нажимным шайбам статора (рис. 8.9).

Число шпилек выбирают в зависимости от диаметра сердечника: принимают 4 шпильки при диаметрах от 1 до 2 м, 6 шпилек при диаметрах от 2 до 2,6 м и 8 шпилек при диаметрах свыше 2,6 м.

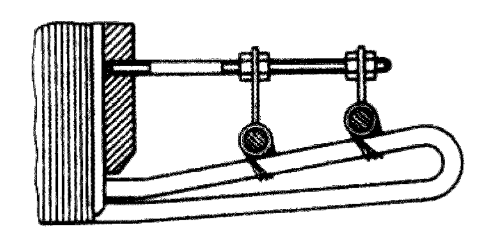


Рис. 8.9. Крепление бандажных колец с помощью шпилек

Пример. Дано: $D = 1{,}2$ м, $h_п = 8{,}5 \cdot 10^{-2}$ м, $x_* = 0{,}15$, вылет лобовой части обмотки 23,4 см.

При высоте паза $h_п = 75$ мм вылет лобовой части равен 23,4 см, поэтому бандажные кольца необходимы (23,4>21,5 см). Принимаем $m_к = 1$, тогда:

по (8.10)

$$Q_к = \frac{1{,}11}{1}\left(\frac{1{,}2}{6 \cdot 0{,}15}\right)^2 \cdot 10^4 = 1{,}973 \cdot 10^4 \text{ Н};$$

по (8.12)

$$d_к = \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}973 \cdot 10^4}{\pi \cdot 1800 \cdot 10^5}} = 0{,}0118 \text{ м}.$$

Для изготовления кольца выбирается пруток диаметром 12 мм.

8.2. СТАНИНЫ

Станины статоров электрических машин выполняют литыми, сварными или из труб. В машинах переменного тока станина является каркасом, в котором располагается магнитопровод статора с обмоткой. Конструкция станины зависит от степени защиты машины. Для асинхронных двигателей закрытого исполнения (степень защиты IP44) (см. рис. 9.7) применяют литые чугунные станины цилиндрической формы. Для улучшения охлаждения машины внешней поверхности станины отливают продольные ребра (при $h \leq$ 355 мм) или

приваривают распределенный воздухоохладитель, состоящий из двух-трех рядов стальных трубок диаметром 32...40 мм (при $h \geq 400$ мм). Между ребрами или через трубки воздухоохладителя наружным вентилятором, расположенным на валу машины, прогоняется охлаждающий воздух. Высоту ребер h_p выбирают равной $(0{,}15—0{,}2)h$. Число ребер, приходящихся на четверть поверхности станины, выбирают от 8 до 12.

Внутренняя поверхность станины у машин небольшой мощности гладкая, обработана для посадки магнитопровода статора, более крупных машин (при $h >$ 400 мм) для закрепления магнитопровода на ней предусматривают продольные ребра.

У двигателей защищенного исполнения (степень защиты IP23) (см. рис. 9.4) станины выполняют литыми с гладкой внешней поверхностью, а на внутренней поверхности имеются 4—6 ребер для посадки магнитопровода. В боковых частях станины предусматривают отверстия для выхода охлаждающего воздуха. Отверстия закрывают жалюзи, которые штампуют из стали или выполняют из алюминиевых сплавов.

В синхронных машинах относительной небольшой мощности станины также выполняют литыми (рис. 8.10).

Для машин переменного тока большой мощности (больше сотен киловатт) чаще всего применяют сварные станины. Сварные станины выполняют в виде кольцевой коробки П-образного сечения и состоят они из ряда продольных балок, приваренных к боковым кольцам (рис. 8.11). В машинах общего назначения чаще всего применяют станины с «глухой» наружной стенкой (см. рис. 8.6). Одна из торцевых наружных стенок 4 такой станины имеет отверстие, диаметр которого меньше внешнего диаметра магнитопровода

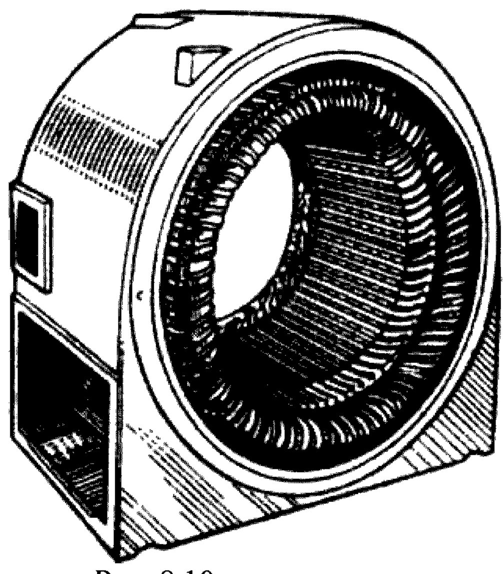


Рис. 8.10. литая станина с впрессованным магнитопроводом

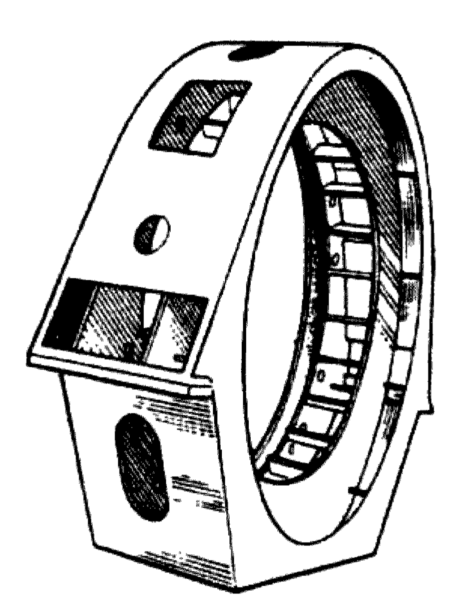


Рис. 8.11. Сварная станина

(глухая стенка). К этой стенке приваривают нажимные пальцы 3. Вторая торцевая стенка открытая, и через нее ведут шихтовку магнитопровода. К этой стенке после прессовки магнитопровода приваривают нажимное кольцо 2 с пальцами 3.

В машинах постоянного тока станина, кроме того, что к ней прикрепляют главные и добавочные полюсы, является частью магнитопровода. В целях уменьшения размеров подшипниковых щитов и повышения их жесткости иногда увеличивают длину станины. Развитая в сторону подшипниковых щитов часть станины может иметь меньшую толщину. Толщину станины определяют из электромагнитного расчета. Полученные размеры станины обеспечивают ее достаточную прочность и жесткость. В машинах постоянного тока станины как при защищенном (степень защиты IP22), так и при закрытом исполнении (степень защиты IP44) (см. рис. 11.3) имеют гладкую внешнюю поверхность. При высотах оси вращения до 200 мм станины выполняют из цельнотянутых стальных труб, а при больших высотах оси вращения сваривают из толстолистовой стали, свернутой в трубу. Сварной шов целесообразно располагать по линии главных полюсов, чтобы исключить влияние этого шва на распределение магнитного потока. В удлиненных станинах предусматривают люки для обслуживания коллектора и подачи охлаждающего воздуха.

Для улучшения работы двигателей постоянного тока при питании их от тиристорных преобразователей целесообразно магнитопровод статора выполнять шихтованным из листов электротехнической стали толщиной 0,5...1 мм, а затем запрессовывать его в литой корпус.

При проектировании станины электрической машины в нижней ее части должны быть предусмотрены лапы, с помощью которых она крепится к фундаменту. Расположение лап на станине должно быть таким, чтобы можно было свободно вставлять в их отверстия крепящие машину болты, а в машинах постоянного тока — еще и не затруднять установку и выем болтов, крепящих полюсы. Опорные лапы либо отливают вместе со станиной, либо изготовляют отдельно. Кроме того, на станине должны быть окна и приваренные или отлитые основания для размещения коробки вводных проводов.

В верхней части станины делают приливы или приваривают бобышки, в которых высверливают отверстия и нарезают резьбу для рым-болтов. В малых машинах делают один рым-болт, а у более крупных — два. При массе машины менее 30 кг рым-болт отсутствует. Станины должны иметь зажим для заземления.

При внешнем диаметре станины менее 1...1,5 м к ее торцам болтами привертывают подшипниковые щиты, для чего на торцах должны быть выполнены кольцевые заточки для посадки и предусмотрены приливы или

ушки с нарезными отверстиями для крепления щитов. При больших диаметрах станины применяют стояковые подшипники.

В последнее время получили распространение станины прямоугольной формы. Машина такой формы лучше вписывается в интерьер производственных помещений, гармонируя с прямыми линиями колонн, окон, станков и т. п. Кроме того, при прямоугольной форме станины удается лучше использовать ее внутренний объем и за счет этого уменьшить размеры машины.

В новой серии RA для машин с высотой оси вращения 71...132 мм используют алюминиевые станины, получаемые экструзией. Станины имеют горизонтально-вертикальное оребрение улучшенную эстетичность формы [13].

8.3. ВАЛЫ

Электрические машины общего назначения выполняют преимущественно с горизонтальным расположением вала. В этом случае вал несет на себе всю массу вращающихся частей, через него передается вращающий момент машины. При сочленении машины с исполнительным механизмом (для двигателя) или с приводным двигателем (для генератора) через ременную или зубчатую передачу, а также и через муфту на вал действуют дополнительные изгибающие силы. Кроме того, на вал могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, усилия, появляющиеся из-за наличия небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении крутильных колебаний. Правильно сконструированный вал должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал должен так же иметь достаточную жесткость, чтобы при работе машины ротор не задевал о статор. Критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочих частот вращения машины. При критической частоте вращения вынуждающая сила небаланса имеет частоту, равную частоте собственных поперечных колебаний вала (т. е. наступает явление резонанса), при которой резко увеличиваются прогиб вала и вибрация машины.

Валы изготовляют из углеродистых сталей, преимущественно из стали марки 45. Для повышения механических свойств сталей их подвергают термической обработке.

Размеры вала определяют при разработке конструкции. Валы имеют ступенчатую форму с большим диаметром в месте посадки магнитопровода ротора. Число ступеней вала зависит от количества узлов машины, размещаемых на нем (магнитопровод, коллектор, подшипники вентилятор, контактные кольца и т. д.). При переходе с одного диаметра вала на другой для предупреждения

недопустимой концентрации напряжений в местах переходов должны быть предусмотрены закругления (галтели) максимально возможного радиуса. Отношение радиуса галтели к диаметру вала должно быть больше 0,05. По этой же причине не следует применять отношение диаметров соседних ступеней вала более 1,3. Иногда для фиксации положения пакета магнитопровода ротора на валу предусматривается упорный буртик. Диаметр вала, см, в той его части, где размещается магнитопровод, предварительно можно выбрать по формуле

$$d_c = k_B \sqrt[3]{P_{ном} / n_{ном}}, \tag{8.13}$$

где $P_{ном}, n_{ном}$ — номинальные значения соответственно мощности, кВт, частоты вращения, об/мин; k_B — коэффициент, значение которого следует принять равным 24—29 для машины средней мощности и 18—20 для крупных машин (от 400 кВт и выше).

Окончательные размеры вала устанавливаются после его расчетов на жесткость и прочность. Свободный конец вала имеет цилиндрическую или коническую форму. Широкое применение имеют валы с цилиндрическим концом. На этот конец насаживают полумуфту, или шкив, или шестерню, которые закрепляют с помощью шпонки. На валу имеется еще ряд шпонок для закрепления различных узлов, размещаемых на валу. В цепях упрощения обработки вала ширину всех шпонок желательно брать такой же, как и у свободного конца.

Размеры свободного конца вала (рис. 8.12) должны быть выбраны в соответствии с ГОСТ (табл. 8.1). Концы валов предусматриваются двух исполнений — длинные и короткие.

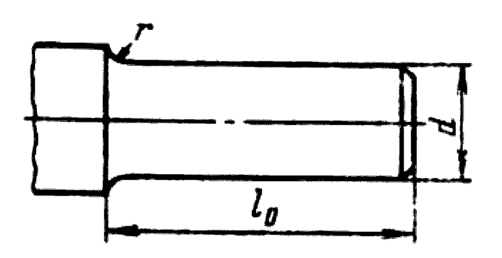


Рис. 8.12. Свободный конец вала

Шпонки для свободного конца вала выбирают по стандартам.

При конструировании вала следует также согласовать размеры шеек вала, на которых размещают подшипники, с размерами выбранных подшипников.

Расчет вала на жесткость. При расчете прогиба вала принимают, что вся масса активной стали ротора с обмоткой и коллектором (в машинах постоянного тока) и участка вала под ними приложена в виде сосредоточенной силы G_p посредине длины магнитопровода. Массу указанных частей определяют по данным электромагнитного расчета. Массой остальных частей вала можно пренебречь.

Таблица 8.1. **Цилиндрические концы валов**

d, мм	l_0, мм		d, мм	l_0, мм	
	Исполнение			Исполнение	
	1	2		1	2
7	16	—	80	170	130
9	20	—	85		
11	23	—	90		
14	30	—	95		
16	40	28	100	210	165
18			110		
19			125		
22	50	36	140	250	200
24			150	250	210
28	60	42	160		
32	80	58	170	300	240
38			180		
42	100	82	190	350	280
48			200		
55			220		
60	140	105	250	410	330
65			280	470	380
70			320	550	450
75			360		

Принимая, что ротор асинхронного двигателя или якоря машины постоянного тока представляют собой сплошной цилиндр с плотностью 8300 кг/м^3, его массу можно определить как

$$m_p = 6500 D_2^2 l_2 .$$

Масса ротора синхронной машины приближенно равна:

$$m_{p.c} \approx 6260 D_2^2 l_j ,$$

а масса коллектора

$$m_к = 6100 D_к^2 l_к ,$$

где D_2 — внешний диаметр ротора (якоря), м; l_2 — длина сердечника без радиальных вентиляционных каналов, м; $D_к, l_к$ — внешний диаметр и длина коллектора, м; l_j — длина ротора.

В машинах постоянного тока в том случае, когда коллектор насаживается на вал, расчет прогиба вала проводят исходя из приведенной силы тяжести (рис. 8.13):

$$G_p = G'_p + \varphi G_к = 9{,}81(m_p + \varphi m_к) , \qquad (8.14)$$

где m_p — масса якоря с обмоткой и валом, кг; $m_к$ — масса коллектора с валом под ним, кг; φ — коэффициент, который принимают из табл. 8.2 в зависимости от отношений b/l и a_1/l (см. рис. 8.13).

При креплении корпуса коллектора к корпусу якоря масса коллектора учитывается как прибавка к массе якоря.

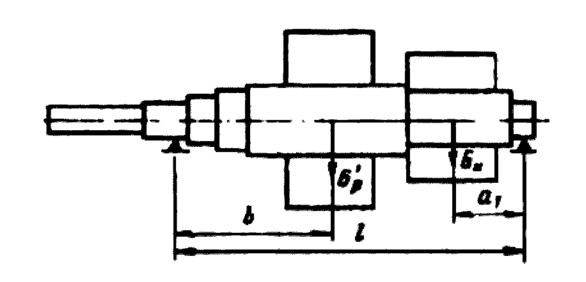


Рис. 8.13. К определению коэффициента φ

Таблица 8.2. **Зависимость** b/l **и** a_1/l

b/l	a_1/l					
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
0,3	0,6	0,84	1,02	1,12	1,12	1
0,4	0,55	0,77	0,94	1,03	1	0,86
0,5	0,56	0,78	0,94	1	0,94	0,78
0,6	0,62	0,86	1	1,03	0,94	0,77
0,7	0,75	1	1,12	1,12	1,02	0,82

При определении прогиба вала воспользуемся аналитическим методом. Для этого необходимо иметь эскиз вала со всеми его размерами (рис. 8.14). Вал разбивают на три участка: a, b и c. Прогиб вала, м, под действием силы G_p на участке, соответствующем середине магнитопровода,

$$f_G = \frac{G_p}{3El^2}(S_b a^2 + S_a b^2), \tag{8.15}$$

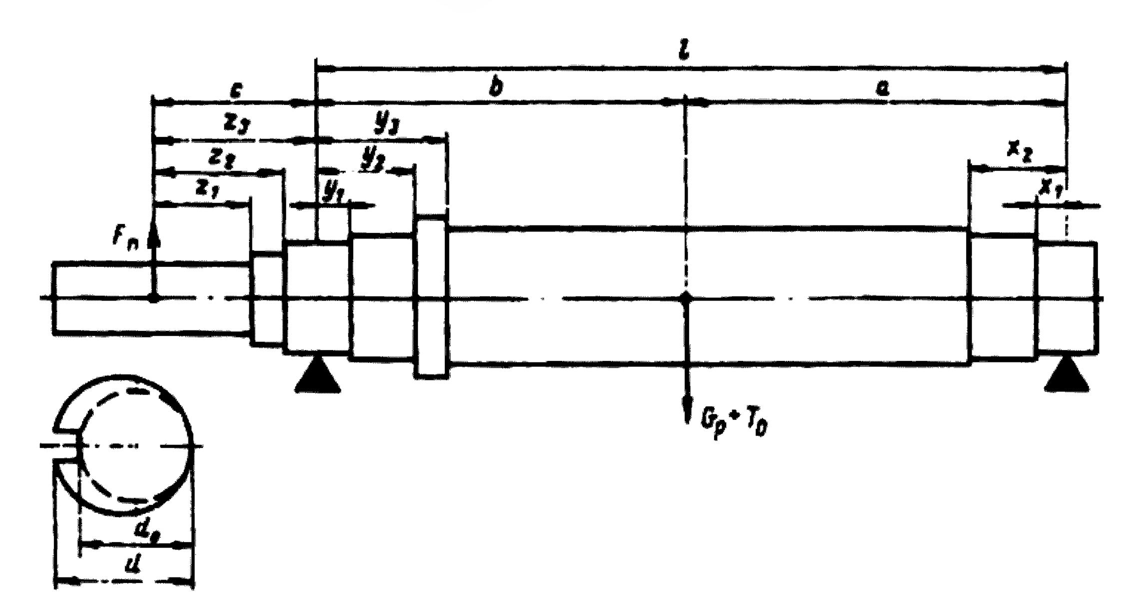


Рис. 8.14. Эскиз вала

где E — модуль упругости: $E = 2{,}06 \cdot 10^{11}$ Па;

$$S_a = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i}, \quad S_в = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}, \tag{8.16}$$

J_i — экваториальный момент инерции вала, м^4; для сплошного вала диаметром d имеем $J = \pi d^4 / 64$, для полного вала $J = \pi(d^4 - d_{отв}^4) / 64$; $G_p = 9{,}81 m_p$ — силы тяжести ротора, Н.

В (8.15) все линейные размеры должны быть приняты в метрах. Расчет f_G удобно представить в виде таблицы (см. пример расчета).

Электрическая машина сочленяется с исполнительным механизмом или двигателем одним из указанных способов: через ременную передачу, зубчатую передачу или через упругую муфту. При работе машины возникают поперечные силы F_n приложенные к выступающему концу вала и соответственно вызванные натяжением ремня, давлением на зубец шестерни или же неточностью сопряжения валов и изготовлением деталей муфты. Эту силу F_n, Н, можно определить как

$$F_n = k_n M_{ном} / R, \tag{8.17}$$

где $M_{ном}$ — номинальный вращающий момент, Н·м:

для двигателя

$$M_{ном} = 9550 P_{ном} / n_{ном},$$

для генератора (8.18)

$$M_{ном} = 9550 P_{ном} / (\eta n_{ном}).$$

$P_{ном}, n_{ном}$ — номинальные мощность, кВт, и частота вращения, об/мин; k_n коэффициент, при передаче упругой муфтой $k_n = 0{,}3$, при передаче зубчатыми шестернями $k_n = 1{,}05$, при передаче клиновыми ремнями $k_n = 1{,}8$, при передаче плоскими ремнями $k_n = 3$; R — радиус делительной окружности шестерни или радиус по центрам пальцев муфты или окружности шкива, м.

Сила F_n вызывает дополнительный прогиб вала под серединой магнитопровода:

$$f_n = \frac{F_n c}{3 E l^2} \left[\left(\frac{3}{2} l S_0 - S_B \right) a + S_a b \right], \tag{8.19}$$

где $S_0 = \sum \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$ (см. рис. 8.14 и табл. 8.3), c — расстояние от точки приложения силы F_n до ближайшей опоры, м.

При сочленении валов с помощью шкива или зубчатой шестерни точка приложения силы F_n лежит в середине свободного конца вала (см. рис. 8.14). При сочленении валов эластичной муфтой сила приложения лежит посредине упругой части пальцев.

Прогиб вала вызывают также силы одностороннего притяжения, которые возникают, если ротор будет смещен из центрального положения по отношению внутреннего диаметра статора. Первоначально смещение ротора происходит вследствие неточности обработки, износа подшипников и прогиба вала под действием сил G_p и F_n Первоначальное смещение ротора, м, принимают равным:

$$e_0 = 0{,}1\delta + f_G + f_n \tag{8.20}$$

где δ — воздушный зазор, м.

Вследствие смещения ротора магнитные потоки полюсов будут неодинаковыми. У полюсов, расположенных со стороны меньших воздушных зазоров, потоки больше. Соответственно больше и сила поперечного магнитногопритяжения. Силу одностороннего магнитного притяжения, Н, вызванную смещением ротора на e_0, определяют по формуле

$$T_0 = 2{,}94 D_2 l_2 \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5, \tag{8.21}$$

где D_2 — диаметр ротора, м; l_2 — длина ротора без радиальных каналов, м.

Сила T_0 вызывает дополнительный прогиб вала, который пропорционален прогибу f_G от силы тяжести ротора:

$$f_T = f_G T_0 / G_p. \tag{8.22}$$

Вследствие увеличения прогиба силы магнитного притяжения увеличатся, что вызовет дальнейшее увеличение прогиба. Так будет продолжаться до тех пор, пока магнитное притяжение и жесткость вала не уравновесятся, при этом установившийся прогиб под действием сил магнитного притяжения будет равен:

$$f_m = f_T / (1 - m), \tag{8.23}$$

где $m = f_T / e_0$.

Результирующий прогиб вала определяется для наихудшего случая, когда остальные составляющие прогибов суммируются:

$$f = f_M + f_G + f_п. \tag{8.24}$$

Для надежной работы машины выбор допустимого прогиба зависит от способа ее сочленения с исполнительным механизмом или двигателем.

При применении упругой соединительной муфты суммарный прогиб в процентах длины воздушного зазора должен составлять в асинхронных двигателях не более 10%, в синхронных машинах — не более 8% и в машинах постоянного тока — не более 6 %. При сочленении посредством ременной передачи прогиб должен быть не более 10% воздушного зазора. При ограничении перекоса зубьев при зубчатой передачи прогиб не должен превышать 10% у синхронных двигателей, 7% у синхронных машин и 5% у машин постоянного тока

Таблица 8.3. **Параметры участков вала**

№ участка	d_i, м	J_i, м^4	y_i, м	y_i^3, м^3	$y_i^3 - y_{i-1}^3$, м^3	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}$, м$^{-1}$	y_i^2, м^2	$y_i^2 - y_{i-1}^2$, м^2	$\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i}$, м$^{-2}$
Левая часть									
1	$11\cdot10^{2}$	$718\cdot10^{8}$	$2,5\cdot10^{2}$	$15,62\cdot10^{6}$	$15,62\cdot10^{6}$	$0,0217\cdot10^{2}$	$6,25\cdot10^{4}$	$6,25\times$ $\times10^{-4}$	$0,0087\times$ $\times10^{4}$
2	$13,5\cdot10^{-2}$	$1630\cdot10^{-8}$	$11\cdot10^{-2}$	$1331\cdot10^{-6}$	$1315,38\cdot10^{6}$	$0,807\cdot10^{2}$	$121\cdot10^{-4}$	$114,755\times10^{-4}$	$0,07\cdot10^{4}$
3	$15\cdot10^{2}$	$2484\cdot10^{8}$	$49,1\cdot10^{2}$	$118371\cdot10^{6}$	$117040\cdot10^{6}$	$47,12\cdot10^{2}$	$2410,8\cdot10^{4}$	$2296,05\times10^{4}$	$0,924\cdot10^{1}$
				$S_b = \sum\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i} = 47,95\cdot10^2$, м$^{-1}$			$S_0 = \sum\frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i} = 1\cdot10^4$, м^2		
№ участка	d_i, м	J_i, м^4	x_i, м	x_i^3, м^3	$x_i^3 - x_{i-1}^3$, м^3	$\frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i}$, м$^{-1}$			
Правая часть									
1	$11\cdot10^{2}$	$718\cdot10^{8}$	2,5	$15,62\cdot10^{6}$	$15,62\cdot10^{6}$	$0,0217\cdot10^{2}$			
2	$13,5\cdot10^{2}$	$1630\cdot10^{8}$	11	$1331\cdot10^{6}$	$1315,38\cdot10^{6}$	$0,807\cdot10^{2}$			
3	$15\cdot10^{-2}$	$2484\cdot10^{-8}$	43,1	$80063\cdot10^{-6}$	$78732\cdot10^{-6}$	$31,7\cdot10^{2}$			
				$S_a = \sum\frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i} = 32,53\cdot10^2$, м$^{-1}$					

Критическая частота вращения. Для определения критической частоты вращения, об/мин, воспользуемся приближенной формулой, которая получена при учете одностороннего магнитного притяжения в предложении, что ротор представляет однородную массу:

$$n_к \approx 30\sqrt{(1-m)/f_G}\,. \qquad (8.25)$$

Рабочая частота вращения ротора должна отличаться от критической не менее чем на 30%.

Расчет вала на прочность. Вал электрических машин передает вращающий момент и, кроме того, испытывает изгибающие усилия от сил тяжести, магнитного притяжения и от поперечных сил на свободном конце. В результате этого вал испытывает совместное действие напряжения изгиба и напряжения кручения.

При совместном действии и кручения по теории наибольших касательных напряжений приведенное к случаю изгиба напряжения, Па, определяется по формуле

$$\sigma_{ПР} = \sqrt{\sigma^2 + 4(\alpha\tau)^2}\,, \qquad (8.26)$$

где σ – напряжение изгиба, Па; τ – напряжение кручения, Па; α – отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному допускаемому напряжению при кручении.

Учитывая, что

$$\sigma = M_и /(0{,}1d^3) \tag{8.27}$$

и

$$\tau = kM_{ном} /(0{,}2d^3), \tag{8.28}$$

после подстановки их в (8.26) получаем расчетную формулу

$$\sigma_{ПР} = \frac{1}{W}\sqrt{M_и^2 + (k\alpha M_{ном})^2}, \tag{8.29}$$

где W — момент сопротивления при изгибе, м^3, для вала диаметром d:

$$W = 0{,}1d^3; \tag{8.30}$$

$M_и$ — изгибающий момент в расчетном сечении, Н·м; $M_{ном}$ — номинальный вращающий момент, Н·м; k — коэффициент перегрузки, который в среднем можно принять равным 2—2,5; α — коэффициент, $\alpha = 0{,}6$ для нереверсивных машин и $\alpha = 0{,}8$ для реверсивных.

Расчет вала на прочность заключается в определении напряжений в сечении каждой его ступени. Для этого необходимо для каждой ступени определить изгибающий момент с учетом перегрузки и момент сопротивления при изгибе. На участках вала, ослабленных шпоночными канавками, момент сопротивления определяется по диаметру d_0 (см. рис. 8.14). Изгибающий момент, Н·м:

для участка вала c (см. рис. 8.14)

$$M_и = kF_n z_i; \tag{8.31}$$

для участка b

$$M_и = kF_n c\left(1 - \frac{y_i}{l}\right) + (G_p + T)\frac{\alpha y_i}{l}, \tag{8.32}$$

для участка a

$$M_и = \left[kF_n c + (G_p + T)b\right]\frac{x_i}{l}. \tag{8.33}$$

Нагрузка от установившегося магнитного притяжения, Н,

$$T = T_0 /(1 - m). \tag{8.34}$$

Расчетные значения $\sigma_{ПР}$ сопоставляют с допускаемым для данного материала. Допускаемое значение напряжения не должно превышать 0,7 предела текучести. Для стали марки 45 предел текучести равен $3600 \cdot 10^5$ Па.

Пример. Рассчитать вал асинхронного двигателя, имеющего следующие данные: $M_{ном} = 3190$ Н·м, $n_{ном} = 585$ об/мин, масса ротора (включая среднюю часть вала) 753 кг, внешний диаметр магнитопровода ротора $D_2 = 55 \cdot 10^{\ 2}$, длина магнитопровода ротора без радиальных каналов $l_2 = 36{,}5 \cdot 10^{\ 2}$ м, воздушный зазор $\delta = 0{,}08 \cdot 10^{-2}$ м. Сочленение двигателя с приводом — через эластичную муфту. Диаметр по центрам пальцев муфты $D_1 = 28{,}5 \cdot 10^{\ 2}$ м. Размеры вала приведены на рис. 8.15.

По (8.14)

$$G_p = 9{,}81 \cdot 753 = 7387 \text{ Н};$$

по (8.17)

$$F_n = 0{,}3 \frac{3190}{0{,}5 \cdot 28{,}5 \cdot 10^{\ 2}} = 6715 \text{ Н}.$$

Прогиб вала посредине магнитопровода под давлением силы тяжести ротора по (8.15)

$$f_G = \frac{7387}{3 \cdot 2{,}06 \cdot 10^{11} \cdot 92{,}2 \cdot 10^{-4}} (47{,}95 \cdot 10^2 \cdot 43{,}1^2 \cdot 10^{-4} + 32{,}53 \cdot 10^2 \cdot 49{,}1^2 \cdot 10^{-4}) = 0{,}0012749 \cdot 10^{-2} \text{ м};$$

$S_b = 47{,}95 \cdot 10^2$ м$^{-1}$ и $S_a = 32{,}53 \cdot 10^2$ м$^{-1}$

(взяты из табл. 8.3).

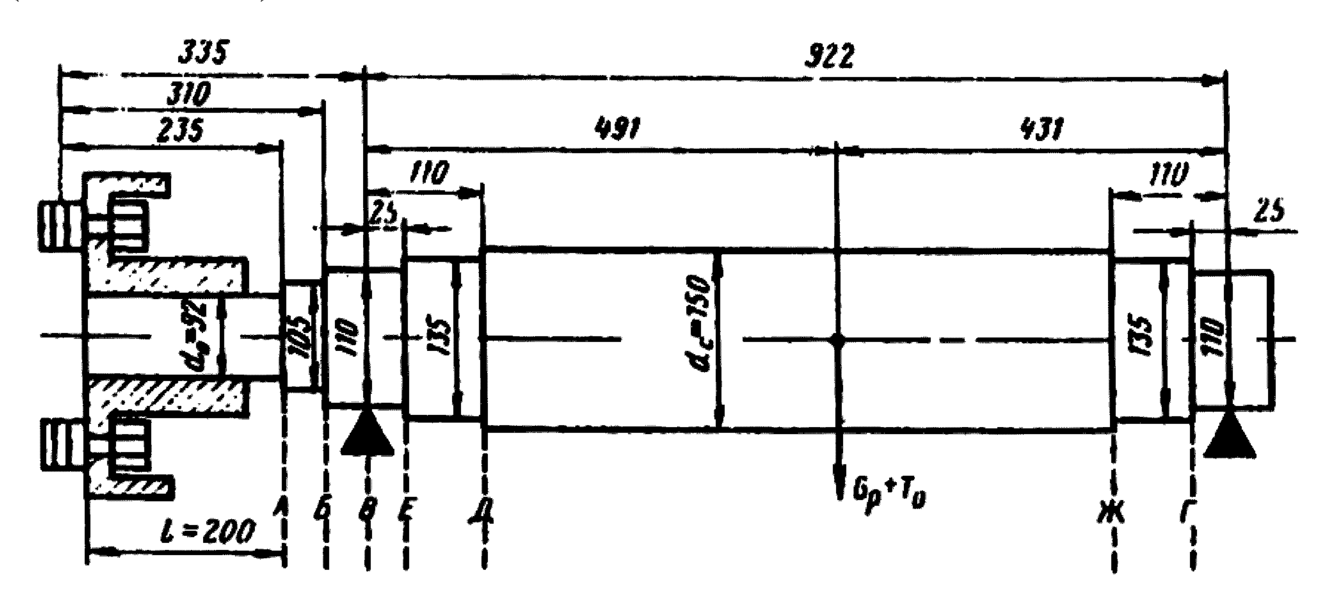


Рис. 8.15. Вал асинхронного двигателя

Прогиб вала посредине магнитопровода ротора от поперечной силы муфты по (8.19)

$$f_n = \frac{6715 \cdot 33{,}5 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 2{,}06 \cdot 10^{11} \cdot 92{,}2^2 \cdot 10^{-4}} \left[(92{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^4 - 47{,}95 \cdot 10^2) \cdot 43{,}1 \cdot 10^{-2} + 32{,}53 \cdot 10^2 \cdot 49{,}1 \cdot 10^{-2} \right] =$$
$$0{,}00235 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

Первоначальное смещение ротора по (8.20)

$$e_0 = 0{,}1 \cdot 0{,}08 \cdot 10^{\ 2} + 0{,}0012749 \cdot 10^{\ 2} + 0{,}00235 \cdot 10^{\ 2} = 0{,}011625 \cdot 10^{\ 2} \text{ м.}$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения по (8.21)

$$T_0 = 2{,}94 \cdot 55 \cdot 10^{\ 2} \cdot 36{,}5 \cdot 10^{\ 2} \frac{0{,}011 \cdot 625 \cdot 10^{\ 2}}{0{,}08 \cdot 10^{\ 2}} \cdot 10^5 = 8576{,}4 \text{ Н.}$$

Прогиб от силы T_0 по (8.22)

$$f_T = 0{,}0012749 \cdot 10^{-2} \frac{8576{,}4}{7387} = 0{,}00148 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения по (8.23)

$$f_M = \frac{0{,}00148 \cdot 10^{-2}}{1 - 0{,}127} = 0{,}001695 \cdot 10^{-2} \text{ м;}$$

$$m = \frac{0{,}00148}{0{,}011625} = 0{,}127.$$

Суммарный прогиб посредине магнитопровода ротора

$$f = (0{,}001695 + 0{,}0012749 + 0{,}00235) \cdot 10^{-2} = 0{,}00532 \cdot 10^{-2} \text{ м;}$$

т. е. составляет 6,65%, что допустимо.

Критическая частота вращения по (8.25)

$$n_{кр} = 30\sqrt{\frac{1 - 0{,}127}{0{,}0012749 \cdot 10^{-2}}} = 7850 \text{ об/мин} > 1{,}3\ n_{ном}.$$

В расчете на прочность принимаем коэффициент перегрузки $k = 2$.

Напряжение на свободном конце вала в сечении A (см. рис. 8.15):

$$M_{иA} = 2 \cdot 6715 \cdot 23{,}5 \cdot 10^{-2} = 3156 \text{ Н·м;}$$

по (8.30)

$$W_A = 0{,}1 \cdot 9{,}2^3 \cdot 10^{-6} = 77{,}87 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

по (8.29)

$$\sigma_{ПР.A} = \frac{\sqrt{3156^2 + (2 \cdot 0{,}6 \cdot 3190)^2}}{77{,}87 \cdot 10^{-6}} = 635{,}7 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение в сечение $Б$:

$$M_{иБ} = 2 \cdot 6715 \cdot 31 \cdot 10^{-2} = 4163 \text{ Н·м;}$$

$$W_Б = 0{,}1 \cdot 10{,}5^3 \cdot 10^{-6} = 115{,}8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$\sigma_{ПР.Б} = \frac{\sqrt{4163^2 + (2 \cdot 0{,}6 \cdot 3190)^2}}{115{,}8 \cdot 10^{-6}} = 488 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение в сечении E:

из (8.32) и (8.34)

$$M_{иE} = 2 \cdot 6715 \cdot 33{,}5 \cdot 10^{-2}\left(1 - \frac{2{,}5 \cdot 10^{-2}}{92{,}2 \cdot 10^{-2}}\right) + (7387 + 9824{,}05) \cdot 43{,}1 \cdot 10^{-2} \frac{2{,}5 \cdot 10^{-2}}{92{,}2 \cdot 10^{-2}} = 4560 \text{ Н·м;}$$

$Г = 8576{,}4/(1-0{,}127) = 9824{,}05$ Н;

$W_Е = 0{,}1 \cdot 11^3 \cdot 10^{-6} = 133 \cdot 10^{-6}$ м^3;

по (8.29)

$$\sigma_{ПР.Е} = \frac{\sqrt{4560^2 + (0{,}6 \cdot 2 \cdot 3190)^2}}{133 \cdot 10^{-6}} = 447 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение в сечении $Д$

$$M_{иД} = 2 \cdot 6715 \cdot 33{,}5 \cdot 10^{-2}\left(1 - \frac{11 \cdot 10^{-2}}{92{,}2 \cdot 10^{-2}}\right) + (7387 + 9824{,}05) \cdot 43{,}1 \cdot 10^{-2}\,\frac{11 \cdot 10^{-2}}{92{,}2 \cdot 10^{-2}} = 4846 \text{ Н·м;}$$

$W_Д = 0{,}1 \cdot 13{,}5^3 \cdot 10^{-6} = 246 \cdot 10^{-6}$ м^3;

$$\sigma_{ПР.Д} = \frac{\sqrt{4846^2 + (2 \cdot 0{,}6 \cdot 3190)^2}}{246 \cdot 10^{-6}} = 252 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение в сечении $Г$

$$M_{иГ} = \left[2 \cdot 6715 \cdot 33{,}5 \cdot 10^{-2} + (7387 + 9824{,}05) \cdot 49{,}1 \cdot 10^{-2}\right] \cdot \frac{2{,}5 \cdot 10^{-2}}{92{,}2 \cdot 10^{-2}} = 351 \text{ Н·м;}$$

$W_Г = 0{,}1 \cdot 11^3 \cdot 10^{-6} = 133 \cdot 10^{-6}$ м^3;

$$\sigma_{ПР.Г} = \frac{\sqrt{351^2 + (2 \cdot 0{,}6 \cdot 3190)^2}}{133 \cdot 10^{-6}} = 287 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Напряжение в сечении $Ж$

$$M_{иЖ} = \left[2 \cdot 6715 \cdot 33{,}5 \cdot 10^{-2} + (7387 + 9824{,}05) \cdot 49{,}1 \cdot 10^{-2}\right] \cdot \frac{11 \cdot 10^{-2}}{92{,}2 \cdot 10^{-2}} = 1545 \text{ Н·м;}$$

$W_Ж = 0{,}1 \cdot 13{,}5^3 \cdot 10^{-6} = 246 \cdot 10^{-6}$ м^3;

$$\sigma_{ПР.Ж} = \frac{\sqrt{1545^2 + (2 \cdot 0{,}6 \cdot 3190)^2}}{246 \cdot 10^{-6}} = 174{,}8 \text{ Па.}$$

Из сопоставления полученных данных следует, что наиболее нагруженным является сечение $А$, для которого

$\sigma_{ПР} = 635{,}7 \cdot 10^5 < 0{,}7 \cdot 3600 \cdot 10^5$ Па.

Таким образом, вал удовлетворяет всем требованиям механических расчетов.

8.4. ПОДШИПНИКИ. ПОДШИПНИКОВЫЕ ЩИТЫ

В электрических машинах с горизонтальным валом подшипники выполняют роль поддерживающих опор. Они воспринимают действия силы тяжести ротора, силы одностороннего притяжения, сил, возникающих от несбалансированности ротора и дополнительных продольных нагрузок от приводных механизмов. В машинах относительно небольшой мощности подшипники размещают в подшипниковых щитах, которые располагаются по торцам машины и предназначаются для прикрытия лобовых частей обмоток.

Подшипниковые щиты выполняют сварными и литыми (рис. 8.16), в средней части щитов выполняют сквозное цилиндрическое отверстие для подшипников. Щиты приболчивают к корпусу.

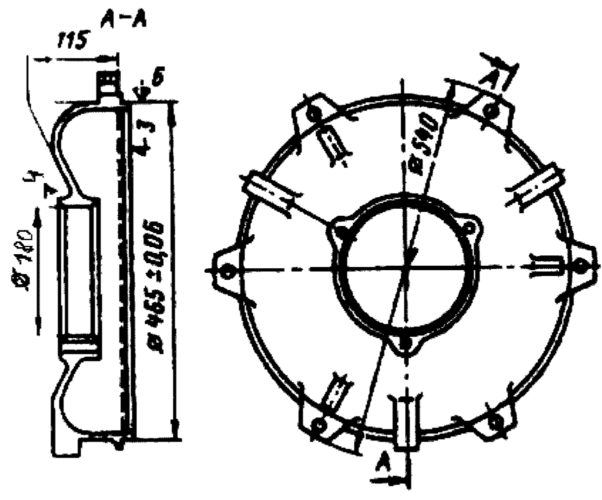


Рис. 8.16. Подшипниковый щит асинхронного двигателя

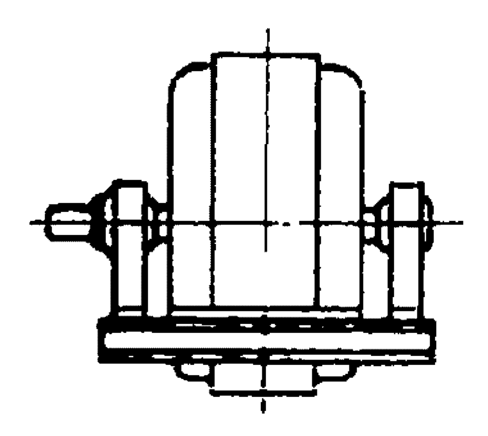


Рис. 8.17. Общий вид машины со стояковыми подшипниками

Для центровки относительно станины в верхней торцевой части щита делают кольцевой буртик. Если буртик подшипникового щита входит в расточку корпуса, то такое сочленение образует внутренний замок. При расположении буртика на наружной поверхности станины замок называется наружным.

В машинах защищенного исполнения в щитах выполняют окна дня прохождения охлаждающего воздуха. Если подшипниковый щит охватывает коллектор или контактные кольца, то для доступа к щеткам в верхней его части делают проемы, закрываемые крышками. Для закрепления щита в станке при его обработке на нем делают специальные технологические приливы.

В машинах большой мощности при внешних диаметрах более 1 м подшипники выносят за корпус и устанавливают на специальных стояках (рис. 8.17). Стояковые подшипники крепят болтами к той же фундаментной плите, на которой установлен корпус. Во избежание появления подшипниковых токов один из стояков изолируют от фундаментной плиты изоляционной прокладкой, при этом с помощью изоляционных трубок и шайб изолируют также крепящие болты и штифты.

Подшипниковые токи, которые замыкаются по контуру вал — стояк подшипника — фундаментная плита — стояк подшипника — вал, приводят к коррозии поверхности подшипников, шеек вала и вызывают старение масла. Причиной появления этих токов является ЭДС, наводимая в вале от сцепленного с ним изменяющего во времени потока, вызванного магнитной несимметрией из-за наличия стыков между частями статора и сегментами, наличием шпоночных канавок, эксцентричным положением ротора и т. д. Появление подшипниковых токов наблюдается главным образом у машин относительно больших мощностей.

По конструктивным признакам подшипники подразделяют на подшипники качения (роликовые и шариковые подшипники) и подшипники скольжения. По

роду воспринимаемой нагрузки различают опорные подшипники с радиальной нагрузкой и упорные подшипники с аксиальной нагрузкой, а по функциональным признакам — несущие и направляющие подшипники.

Подшипники качения. В машинах с горизонтальным расположением вала, в основном, применяют радиальные однорядные шарико- и роликоподшипники. Радиальные шарикоподшипники (рис. 8.18) могут кроме радиальной нагрузки воспринимать некоторую осевую нагрузку. При повышенном радиальном зазоре между шариками и дорожками качения колец подшипник приобретает свойства радиально-упорного подшипника и хорошо работает на восприятие больших осевых нагрузок. Поэтому в некоторых случаях (особенно в малых машинах) такие подшипники могут быть установлены в машинах с вертикальным расположением вала.

Роликоподшипники (рис. 8.19) применяют для больших нагрузок, чем это допустимо для шарикоподшипников. Подшипники, показанные на рис. 8.19, *а* и *б,* могут воспринимать только радиальную нагрузку, а подшипник на рис. 8.19, *в* кроме радиальной нагрузки может воспринимать небольшую осевую нагрузку в одном направлении. В машинах небольшой мощности при $h \leq 200$ мм чаще всего оба подшипника выбираются шариковыми. У машин средней и большой мощности подшипник со стороны привода, воспринимающий большую нагрузку, выбирается роликовым, а с противоположной стороны — шариковым.

От осевого перемещения на посадочных местах под действием осевой нагрузки кольца подшипников удерживаются при помощи выступа и гайки или специальной упорной пластинки, закрепляющейся на болтах в торце вала, — или насаживаемым на вал кольцом. В машинах небольшой мощности обычно не делают фиксации внутреннего кольца шарикоподшипника на валу, а закрепляют

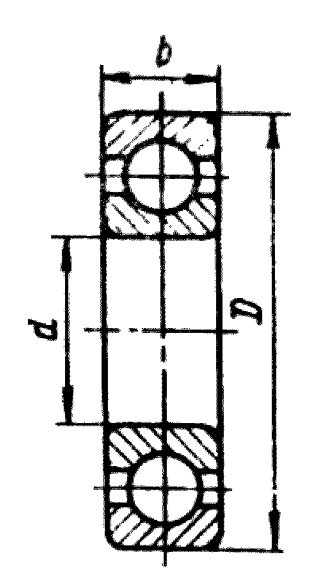


Рис. 8.18. Шарикоподшипник

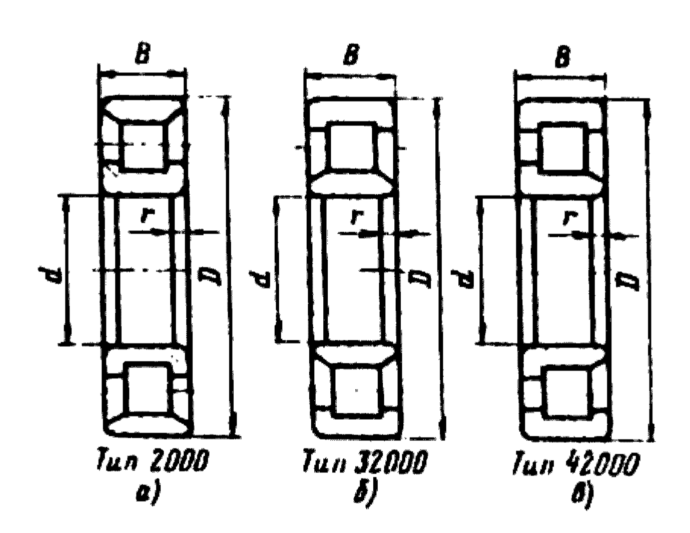


Рис. 8.19. Роликоподшипник

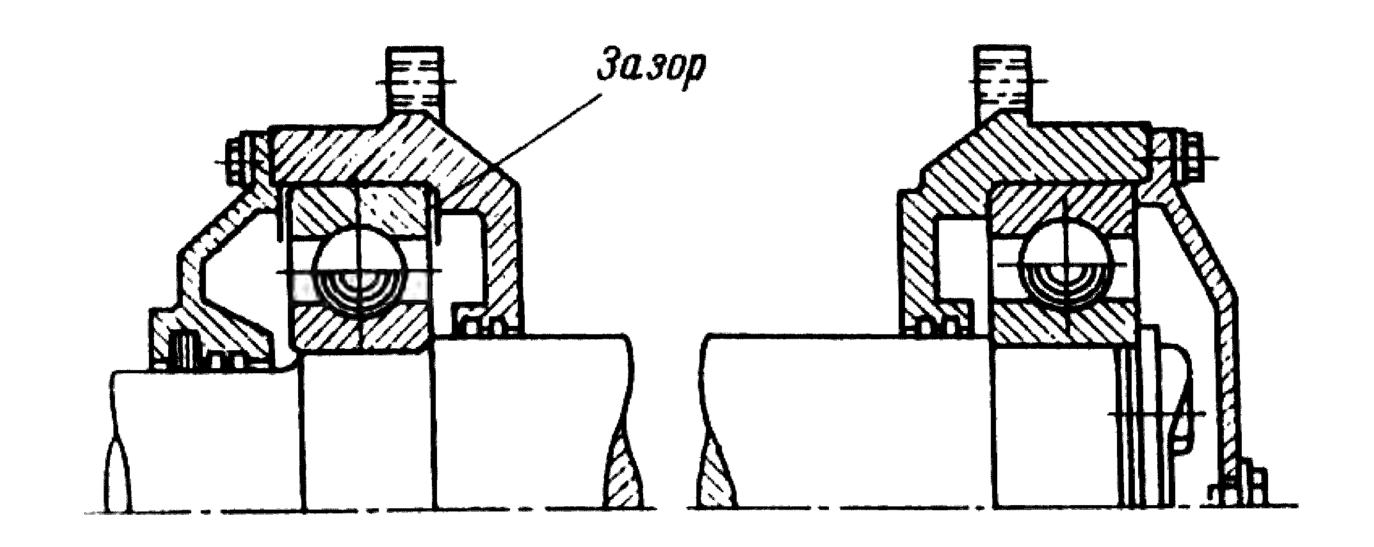


Рис. 8.20. Подшипниковые узлы с шарикоподшипниками

лишь наружное его кольцо подшипниковой крышкой, являющейся одновременно деталью, удерживающей смазку подшипника. Если в машине применяются оба шариковых подшипника, то для возможности перемещения подшипника в осевом направлении при расширении вала у одного из них, а иногда и у обоих, следует предусмотреть зазоры между крышками и наружным кольцом (рис. 8.20).

Подшипники катящегося трения смазываются преимущественно консистентными смазками. Смазка служит для обеспечения коррозийной стойкости подшипников, распределения и отвода тепла, снижения потерь энергии за счет предотвращения сухого трения, уменьшения шума, защиты от попадания грязи. Рабочее пространство подшипникового узла заполняется смазкой не более чем на 2/3 объема. Выбор консистентной смазки проводится на основании данных об условиях работы подшипников.

Дня нормальной работы подшипников необходимо предусмотреть уплотнения подшипниковых узлов, защищающих их от пыли, грязи, а также препятствующих вытеканию смазки в полость машины. Применяются различные конструкции уплотнений: фетровые, кольцевые зазоры, манжетные, лабиринтные и др. На рис. 8.21 показаны некоторые из таких конструкций.

При больших частотах вращения (когда $dn > 300$, где n — частота вращения, об/мин, d диаметр вала, м) для смазки подшипников применяют минеральные масла.

При проектировании машины перед конструктором ставится задача выбора по каталогу типа подшипника, соответствующего нагрузке и условиям их работы.

Для подбора конструкции, типа и размера подшипника необходимо знать: 1) значение и направление действующих на подшипник нагрузок; 2) характер нагрузки (спокойная, ударная, переменная); 3) диаметр цапфы, на которую

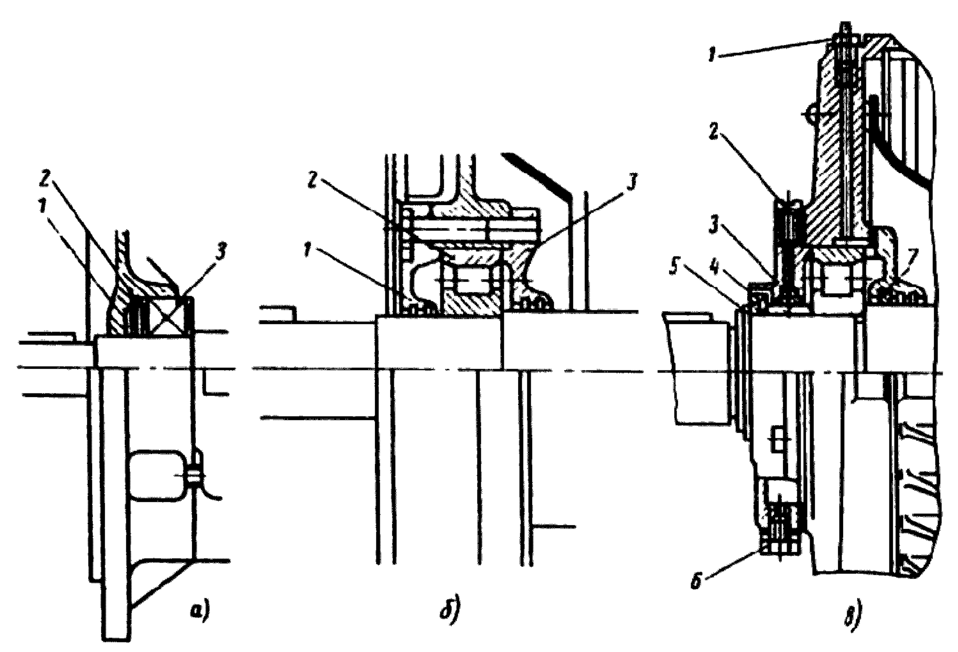


Рис. 8.21. Подшипниковые узлы асинхронных двигателей серии 4А:
а — двигателя 4А112 с герметизированными подшипниками
(*1* — подшипниковый щит; *2* — пружинное кольцо; *3* — герметизированный подшипник);
б — двигателя 4АН180, смазка которого пополняется при разработке
(*1* — наружная крышка подшипника; *2* — подшипник; *3* — внутренняя крышка подшипника);
в — двигателя 4А200 с устройством для пополнения смазки
(*1* — масленка; *2* — пробка; *3* — войлочное уплотнение наружной крышки подшипника; *4* — кольцо уплотнения; *5* — стопорное кольцо; *6* — пробка спускного канала; *7* — войлочное уплотнение внутренней крышки подшипника)

сажается подшипник; 4) частоту вращения машины; 5) желательный срок службы подшипника.

В общем случае на подшипник действуют радиальная и осевая нагрузки. Выбор подшипника проводится по приведенной динамической нагрузке Q. Для однорядных радиальных шарикоподшипников эта нагрузка, Н, определяется по формулам

$$Q = K_н R \text{ при } A/R \le e, \quad (8.35\text{ а})$$

$$Q = K_н(0{,}56R + YA) \text{ при } A/R > e, \quad (8.35\text{ б})$$

где A, R — осевая и радиальная нагрузки на подшипник, Н; $K_н$ — коэффициент, учитывающий характер нагрузки двигателя: при постоянной спокойной нагрузке $K_н = 1$, при нагрузке с умеренными толчками $K_н = 1{,}5$, при нагрузке со значительными толчками $K_н = 2$, при нагрузке с ударами и частыми сильными толчками $K_н = 3$, для машин общего назначения в большинстве случаев можно принять $K_н = 1{,}5 - 2$; Y — коэффициент приведения осевой нагрузки к радиальной. Значение Y и e для однорядных радиальных шарикоподшипников в зависимости от отношения A/C_0 (C_0 — статическая грузоподъемность, Н, см. табл. П5.5) определяют по табл. 8.4.

Таблица 8.4. **Значение Y и e для однорядных подшипников**

A/C_0	e	Y
0,014	0,19	2,3
0,028	0,22	1,99
0,056	0,26	1,71
0,084	0,28	1,55
0,11	0,3	1,45
0,17	0,34	1,31
0,28	0,38	1,15
0,42	0,42	1,04
0,56	0,44	1

Для промежуточных значений A/C_0 применяют линейную интерполяцию. Для электрических машин с горизонтальным расположением вала в большинстве случаев можно не учитывать осевую нагрузку $(A=0)$. При вертикальном расположении вала осевая нагрузка равна, Н:

$$A = G_p + G_{шк} + 0{,}1R,$$

где $G_p, G_{шк}$ — силы тяжести ротора (или якоря с коллектором) и шкива (или полумуфты); $0{,}1R$ — осевое магнитное притяжение.

При определении радиальной нагрузки на подшипники R_A и R_B исходят из наихудшего случая. Для нахождения R_B при односторонней передаче предполагается, что сила F_n направлена вниз, а для R_A — вверх, тогда (рис. 8.22)

$$R_B = F_n\frac{l+c}{l} + (G_p + T_0)\frac{a}{l}; \quad (8.36)$$

$$R_A = F_n\frac{c}{l} + (G_p + T_0)\frac{b}{l}, \quad (8.37)$$

где F_n определяется для работы машины в номинальном режиме, Н; G_p — сила тяжести ротора, Н; T_0 — сила одностороннего магнитного притяжения, Н (см. § 8.3).

Определяя приведенную нагрузку Q, а также учитывая частоту вращения подшипника n и требуемый срок службы $L_Д$, находят динамическую грузоподъемность C (Н), которая является основной характеристикой подшипника:

для шарикоподшипников

$$C = \frac{Q}{25{,}6}\sqrt[3]{L_Д n} \quad (8.38)$$

для роликоподшипников

$$C = \frac{Q}{18{,}5}(L_Д n)^{0{,}3}. \quad (8.38\ а)$$

Срок службы (или долговечность) подшипника может быть задан или его выбирают равным $L_Д \geq (15...20)\cdot 10^3$ ч.

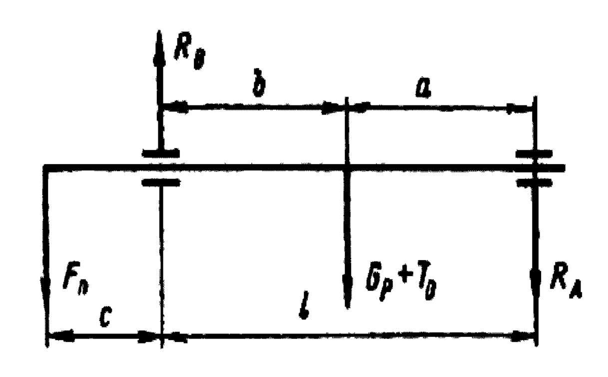


Рис. 8.22. К определению радиальных реакций подшипников

По найденной динамической грузоподъемности по таблицам ГОСТ (см. табл. П5.1 и П5.2) выбирают конкретный подшипник и находят его габаритные размеры. Диаметр внутреннего кольца выбранного подшипника должен быть равен диаметру цапфы (цапфа — часть вала, на которую горячей посадкой насаживается подшипник). Наряду с динамической грузоподъемностью в таблицах приведены данные о предельной частоте вращения. Расчетное значение *C* должно быть меньшим или равным табличному значению. Если расчетное значение *C* получается больше табличного, а долговечность нельзя уменьшить, то следует выбрать подшипник из другой, соответствующей заданным параметрам серии. В некоторых случаях можно пойти на установку сдвоенных подшипников. При применении сдвоенных подшипников, учитывая неравномерность распределения между ними нагрузки, каждый подшипник следует рассчитывать на нагрузку, равную 70 % всей нагрузки опоры. Подбор подшипников рекомендуется производить, начиная с легкой серии.

Подшипники скольжения. В настоящее время подшипники скольжения применяют главным образом для крупных электрических машин и выполняют в виде стояковых подшипников (рис. 8.23). Корпус подшипника изготовляется из чугуна. В корпус входят стояк *1* и верхняя крышка *2*. Основным элементом подшипника являете вкладыш *3* — втулка, разрезанная по образующей на две половины. В его верхней половине выполняют одно или два отверстия для смазочных колец *4*. Вкладыши изготовляются из стали, чугуна, бронзы и других материалов. Толщина вкладышей принимаете равной $s = (0{,}05d + 5\text{ мм})\ldots(0{,}1d + 0{,}5\text{ мм})$, где d — диаметр цапфы. Внутренняя поверхность вкладыша, охватывающая цапфу вала, заливается антифрикционным белым сплавом — баббитом. Для улучшения связи между баббитом и вкладышем последний имеет кольцевые канавки в виде ласточкина хвоста. Толщина слоя заливки в зависимости от диаметра вкладыша равна 2...8 мм. Посадка вкладышей и корпус подшипников выполняется жесткой или самоустанавливающейся (рис. 8.24). При жесткой посадке вкладыш фиксируется в гнезде, при самоустанавливающейся он опирается на шаровые опоры и может занимать положение в своих гнездах соответственно прогибу или перекосу вала.

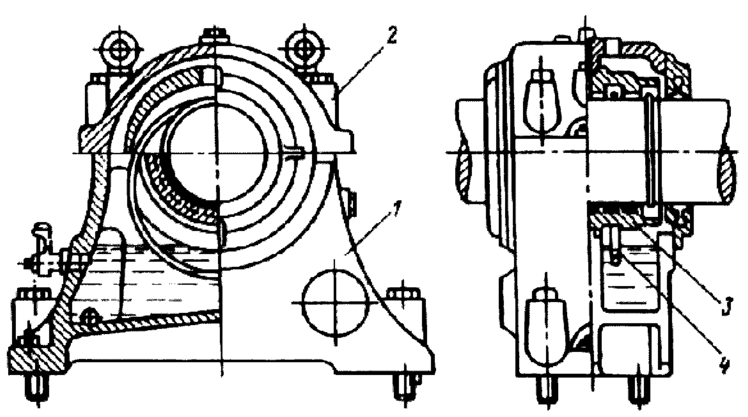


Рис. 8.23. Стояковый подшипник с кольцевой смазкой

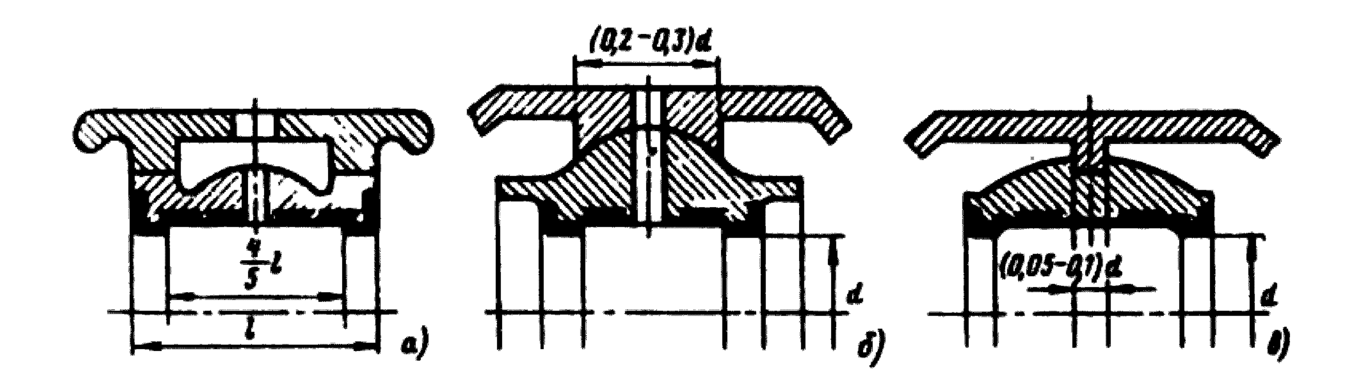


Рис. 8.24. Посадки вкладышей в корпусе подшипника:
а — жесткая; *б* — сферическая; *в* — узкоцилиндрическая

Для смазки трущихся поверхностей применяют масло. Способ подачи смазки выбирают в зависимости от условий работы машины. Наиболее распространенным способом смазки является кольцевая. Для этого на цапфу надевают металлическое кольцо большего диаметра. Кольцо свободно висит на цапфе, погружаясь в масляный резервуар подшипника. При вращении цапфы кольцо также начинает вращаться и, проходя через масляный резервуар, подает масло на верхнюю часть цапфы, где оно растекается по всей поверхности. Для контроля уровня масла в ванной подшипника имеется маслоуказатель, который снабжают смотровым стеклом. Кольцевая смазка применяется при окружных скоростях цапф $v_ц = 2...10$ м/с. При скоростях $v_ц > 10$ м/с применяют принудительную смазку. В этом случае в пространство между трущимися поверхностями подается извне под давлением масло, которое затем стекает в масляную ванну и по спускной трубе идет в холодильник, а затем снова к насосу. При такой смазке в подшипник поступает такое количество масла, которое необходимо для смазки и охлаждения подшипника. Масло подают под давлением $(0,25...1)\cdot 10^5$ Па. Находит применение также комбинированная система смазки, когда при принудительной смазке применяются маслоподающие кольца.

Для предотвращения попадания масла в машину и вытекания его из подшипника в месте выхода из стояка помещают лабиринтные уплотнения и маслоулавливающие кольца.

Отдельные элементы подшипников скольжения стандартизированы.

Выбор подшипника скольжения проводят по табл. 8.5, исходя из нагрузки на подшипник, которую определяют по (8.36) или (8.37).

Таблица 8.5. **Допускаемые нагрузки на подшипники с кольцевой смазкой, кН**

Размеры, мм	Частота вращения, об/мин													
	125	150	167	187	214	250	300	375	428	500	600	750	1000	1500
100×130	—	—	—	—	—	—	—	—	9	10	11	12	14	16
110×130	—	—	—	—	—	—	—	10	11	12	13	14	16	19
120×140	—	—	—	—	—	—	—	12,5	13,5	14,5	15,5	17	20	**24**
130×140	—	—	—	—	—	—	13	14	15	16	17,5	19	22,5	26
140×150	—	—	—	—	—	—	14,5	16,5	17,5	18,5	20,5	22,5	26	30
150×150	—	—	—	—	—	—	16	18	19	20,5	22,5	24	28	32,5
160×160	—	—	—	—	—	—	18,5	20,5	22	23,5	25,5	28	32	—
180×180	—	—	—	—	—	22	24,5	27	29	31	33,5	37	**42**	—
200×200	—	—	—	—	26,5	29	31,5	34,5	36,5	39	42	47	53	—
220×220	—	—	—	31,5	33,5	36,5	39,5	43	46	48,5	54	59	66	—
250×250	—	—	32,5	44	46,5	49,5	53,5	58	61	66	72	**79**	—	—
280×280	—	53,5	55,5	58	61	66	71,5	77,5	82	87,5	94	104	—	—
300×300	—	63	66	69	73	78	84,5	91	97	103	**111**	122,5	—	—
350×350	85	91	95,5	100	105	114	122	134	140	**150**	160	—	—	—
400×400	115	125	130	136	144	155	166	182	190	208	224	—	—	—
450×450	155	165	173	180	190	205	220	241	**256**	273	—	—	—	—
500×500	200	205	223	232	246	265	290	320	340	—	—	—	—	—

Указанные в таблице размеры вкладыша подшипника означают его внутренний диаметр и длину. В таблице приведена ступенчатая линия, которая разграничивает подшипники с кольцевой смазкой (выше линии) и подшипники, требующие принудительной смазки.

Пример. Выбрать подшипники качения для асинхронного двигателя, имеющего следующие данные: $n_{ном} = 585$ об/мин (см. пример расчета в § 8.3), $G_p = 7387$ Н, $T_0 = 8576{,}4$ Н, $F_п = 6715$ Н, $b = 49{,}1 \cdot 10^{\ 2}$ м, $a = 43{,}1 \cdot 10^{\ 2}$ м, $c = 33{,}5 \cdot 10^{\ 2}$ м, $l = 92{,}2 \cdot 10^{\ 2}$ м. Диаметр цапфы $11 \cdot 10^{-2}$ м.

Из (8.37)

$$R_A = 6715\frac{33{,}5}{92{,}2} + (7387 + 8576{,}4)\frac{49{,}1}{92{,}2} = 10940{,}95 \text{ Н};$$

из (8.35 а)

$$Q_A = 1{,}5 \cdot 10940{,}95 = 16411 \text{ Н};$$

из (8.38)

$$C = \frac{16411}{25{,}6}\sqrt[3]{15000 \cdot 585} = 132057 \text{ Н}.$$

При диаметре цапфы 110 мм выбираем шарикоподшипник средней серии 322 ($C = 158000$ Н).

Аналогично

$$R_B = 6715\frac{33{,}5 + 92{,}2}{92{,}2} + (7387 + 8576{,}4)\frac{43{,}1}{92{,}2} = 16617 \text{ Н};$$

$$Q_B = 1{,}5 \cdot 16617 = 24925{,}5 \text{ Н};$$

$$C = \frac{24925{,}5}{18{,}5}(15000 \cdot 585)^{0,3} = 166200 \text{ Н}.$$

При диаметре цапфы 110 мм выбираем радиальный роликоподшипник легкой узкой серии 32222 ($C = 158000$ Н).

8.5. ПОЛЮСЫ

На полюсах электрических машин располагается обмотка возбуждения, которая создает магнитный поток. Необходимый характер распределения этого потока в воздушном зазоре обеспечивается соответствующей конфигурацией полюсного наконечника. Как правило, полюсы машин постоянного тока размещаются на статоре, а у синхронных машин — на роторе. В машинах постоянного тока кроме главных полюсов на статоре размещаются добавочные, предназначенные для улучшения коммутации.

Главные полюсы машин постоянного тока (рис. 8.25) собирают из отдельных листов, которые штампуют из электротехнической стали толщиной 1 мм. Собранные в пакет, они спрессовываются при давлении $(20...25)\cdot 10^5$ Па и скрепляются заклепками. Крайние листы пакета выполняются более толстыми. В зависимости от размера полюса они штампуются из листовой стали толщиной 4...10 мм. Эти листы по размеру делаются несколько меньшими, чем остальные.

Заклепки вставляются в предусмотренные в листах отверстия, а затем развальцовываются в конических углублениях листов (см. рис. 8.25).

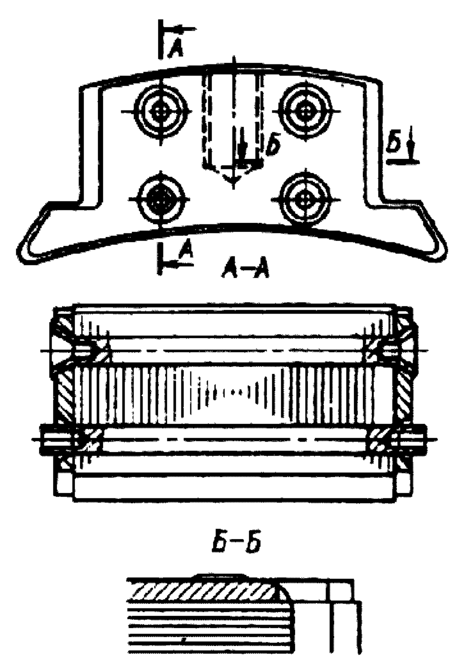


Рис. 8.25. Главный полюс машины постоянного тока

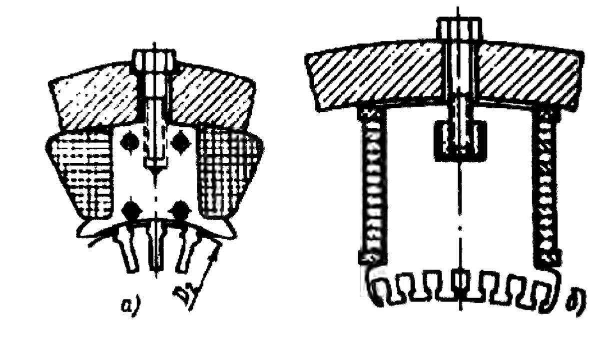


Рис. 8.26. Крепление главного полюса к станине

Они равномерно распределяются по поверхности листов и занимают около 0,02—0,03 этой поверхности. Обычно их не менее четырех. Диаметры отверстий под клепки принимаются на 0,15...0,2 мм больше диаметра самой заклепки. Для полюсов применяются заклепки диаметром 6, 8, 10 и 12 мм.

Полюсы прикрепляются к станине не болтами. Для этого в теле шихтованного полюса высверливаются отверстия, и нарезается резьба (рис. 8.26, *а*). Резьба в шихтованном теле полюса механически ненадежна и не всегда обеспечивает плотное прилегание полюса станине. Поэтому в более крупных машинах, а также у маши, работающих в условиях тряски, болты вворачиваются в стержни, вставляемые в тело полюса (рис. 8.26, *б*).

В крупных машинах постоянного тока в полюсных наконечниках выштамповываются пазы для размещения компенсационной обмотки (рис. 8.26, *б*).

Добавочные полюсы выполняются цельными или собранными из штампованных стальных листов. В машинах относительно небольшой мощности добавочные полюсы выполняются в виде стальных отливок или из полос проката. В настоящее время они часто собираются из листовой стали толщиной 1 мм. На рис. 8.27 даны различные исполнения добавочных полюсов. Сердечник полюса и его наконечник (рис. 8.27, *а*) выполняются из одной заготовки путем ее последующей обработки. Полочки (рис. 8.27, *б* и *г*), служащие для поддержания катушек, выполняются из немагнитных материалов и прикрепляются заклепками к телу полюса. В машинах относительно большой мощности полюсы выполняются Т-образной формы (рис. 8.27, *в*), при таком их выполнении увеличивается поверхность прилегания полюса к станине и уменьшается индукция в стыке. Полюсы, собранные из отдельных листов, имеют преиму-

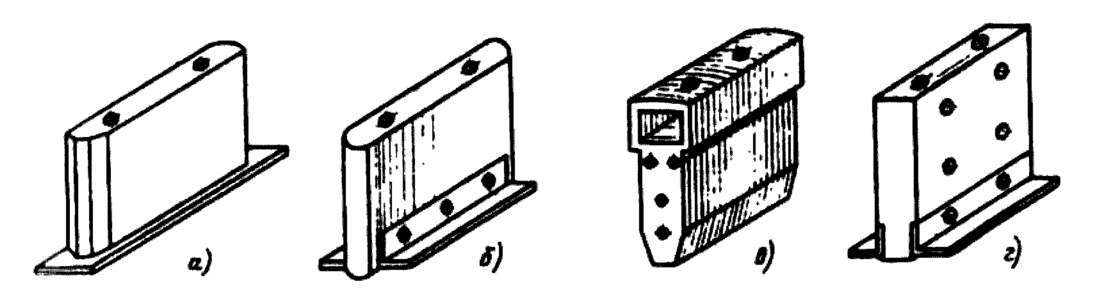


Рис. 8.27. Добавочные полюсы машин постоянного тока

щество перед массивными, так как в них уменьшается действие вихревых токов при переходных процессах, что способствует улучшению коммутации.

При механическом расчете полюсов проверяется их крепление к станине и проводится расчет заклепок.

Расчет крепления главных полюсов в машинах постоянного тока проводится из условия, что на болты, которыми полюс соединяется со станиной, действует тангенциальная сила Q от вращающего момента, а на полюсы, расположенные по горизонтальному диаметру ярма, еще и сила тяжести полюса с обмоткой $G_{п.о}$ (рис. 8.28). Магнитное притяжение полюса якорем в этих расчетах не учитывается, так как он одновременно притягивается и станиной, причем с большой силой вследствие более высокого значения индукции в сердечнике полюса.

Тангенциальная сила, действующая на полюс, Н,

$$Q = kM_{ном}/(pD_2), \tag{8.39}$$

где k - коэффициент перегрузки $(k = 2-3)$; p - число пар полюсов; D_2 — диаметр якоря, м; $M_{ном}$ — номинальный момент, Н·м; $M_{ном} = 9550P_{ном}/n_{ном}$.

Сила тяжести полюса с обмоткой, Н,

$$G_{п.о} = 9{,}81m_{п.о};$$

здесь $m_{п.о}$ — масса полюса с обмоткой, кг.

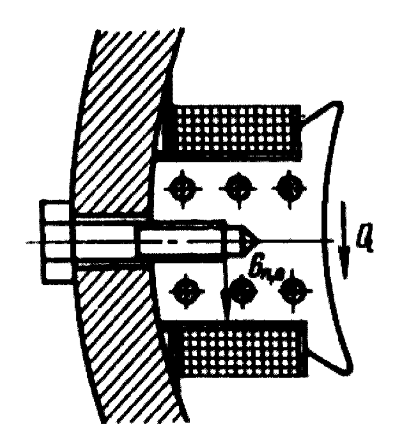


Рис. 8.28 К расчету крепления главного полюса

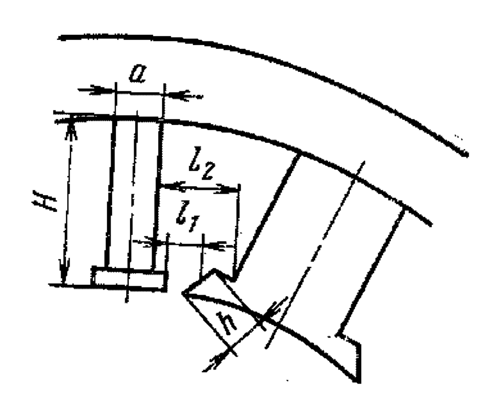


Рис. 8.29 К расчету крепления добавочного полюса

Принимая коэффициент трения между станиной и полюсом равным 0,2, определяют необходимую площадь сечения болтов полюса по внутреннему диаметру резьбы, м^2:

$$S_{\delta} = (Q + G_{п.о})/(0{,}2\sigma), \tag{8.40}$$

где σ — допустимое напряжение растяжения в болтах; для стали марки Ст3 с некоторым запасом $\sigma = 60$ МПа.

Размер болта по внутреннему диаметру резьбы, м, при числе болтов на полюс $m_{\delta}\,(m_{\delta} \geq 2)$

$$d_{01} = \sqrt{4S_{\delta}/(\pi m_{\delta})}. \tag{8.41}$$

Заклепки полюсов проверяются на растяжение:

$$\sigma = \frac{4qS_п}{\pi d_з^2 m_з} \leq 600 \cdot 10^5 \text{ Па}, \tag{8.42}$$

где q — давление спрессованных листов полюса: $q = (20...25)\cdot 10^5$ Па; $S_п$ — площадь вырубки листа полюса, м^2; $m_з$ и $d_з$ число и диаметр, м, заклепок $(m_з \geq 4)$.

Расчет крепления добавочных полюсов проводится, исходя из того, что на болты, притягивающие их к станине, действует усилие магнитного притяжения к соседним разноименным главным полюсам. В передаче вращающего момента добавочные полюсы не участвуют. Учитывая, что основание добавочного полюса значительно уже, чем у главного, необходимо проверить полюс не только на сдвиг, но и на опрокидывание.

Силу взаимодействия между добавочным полюсом и главными полюсами, расположенными по обе стороны от него, различны по значению и направлению. Результирующая сила взаимодействия между концами добавочного полюса и полюсным наконечником соседнего главного полюса равна, Н:

$$Q_1 = hl_Д \frac{(F_ш + kF_c)kF_Д}{4{,}08 \cdot 10^5 l_1^2}, \tag{8.43}$$

Результирующая сила взаимодействия между сердечником добавочного полюса и сердечниками соседних главных полюсов, Н,

$$Q_2 = (H - h)l_Д \frac{(F_ш + kF_c)kF_Д}{18{,}3 \cdot 10^5 l_2^2}. \tag{8.44}$$

В приведенных формулах обозначения величин соответствуют обозначениям на рис. 8.29, $l_Д$ — осевая дайна добавочного полюса. Магнитодвижущие силы параллельной обмотки возбуждения $F_ш$, последовательной обмотки F_c и добавочных полюсов $F_Д$ принимаются для номинального режима из электромагнитного расчета; k — коэффициент перегрузки.

Полюс, расположенный по горизонтальному диаметру ярма, находится в наихудших условиях, поскольку действующие силы тяжести и магнитного притяжения суммируются. Для этого полюса расчетное натяжение болтов, при котором сила трения между станиной и полюсом обеспечивает отсутствие сдвига полюса, равно, Н:

$$P' = (Q_1 + Q_2 + G_{Д.П})/0{,}2, \tag{8.45}$$

где $G_{Д.П}$ — сила тяжести добавочного полюса с обмоткой, Н; 0,2 — коэффициент трения между станиной и полюсом.

Расчетное натяжение болтов, которое обеспечивает отсутствие опрокидывания полюса, Н,

$$P'' = \frac{H}{0{,}5a}(0{,}9Q_1 + 0{,}7Q_2 + 0{,}5G_{Д.П}). \tag{8.46}$$

Расчет болтов ведется по наибольшему натяжении P' или P''.

Внутренний диаметр резьбы болта, м,

$$d_{02} = \sqrt{4p/(\pi m_Д \sigma)}, \tag{8.47}$$

где $m_Д$ — число болтов: $m_Д \geq 2$.

В целях унификации болтов для крепления главных и добавочных полюсов при небольшой разнице в их диаметрах принимают одинаковыми.

Пример. Исходные данные: $P_{ном} = 150$ кВт, $n_{ном} = 1450$ об/мин, $D_2 = 36{,}8\cdot 10^{-2}$ м, $l = l_Д = 25{,}5\cdot 10^{-2}$ м, $F_Д = 6000$ А, $F_c = 2000$ А, $F_ш = 7400$ А, $m_{Д.П} = 22$ кг, $m_{П.О} = 48$ кг, $l_1 = 4{,}5\cdot 10^{-2}$ м, $l_2 = 7{,}5\cdot 10^{-2}$ м; $H = 13\cdot 10^{-2}$ м, $h = 2\cdot 10^{-2}$ м, $a = 4\cdot 10^{-2}$ м, $S_n = 182\cdot 10^{-4}$ м^2, $m_3 = 6, d_3 = 1{,}2\cdot 10^{-2}$ м, $k = 2, m_\delta = 2$, $m_Д = 2$.

Расчет болтов главного полюса:

номинальный момент

$$M_{ном} = 9550\frac{150}{1450} = 987{,}9 \text{ Н·м};$$

тангенциальная сила по (8.39)

$$Q = 2\cdot 987{,}9/(2\cdot 36{,}8\cdot 10^{-2}) = 2684{,}5 \text{ Н};$$

сила тяжести полюса с обмоткой

$$G_{П.О} = 9{,}81\cdot 48 = 471 \text{ Н};$$

из (8.40)

$$S_\delta = (2684{,}5 + 471)/(0{,}2\cdot 600\cdot 10^5) = 26{,}29\cdot 10^{\ 5} \text{ м}^2;$$

внутренний диаметр болта

$$d_{01} = \sqrt{\frac{4\cdot 26{,}29\cdot 10^{-5}}{3{,}41\cdot 2}} = 1{,}3\cdot 10^{-2} \text{ мм} = 13 \text{ мм}$$

Выбираем болт М16 ($d_{01} = 13{,}835$ мм).

Проверка заклепок главных полюсов из (8.42)

$$\sigma = \frac{4\cdot 20\cdot 10^5\cdot 128\cdot 10^{\ 4}}{3{,}14\cdot 1{,}2^2\cdot 10^{\ 4}\cdot 6} = 537\cdot 10^5 < 600\cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Расчет болтов добавочного полюса
из (8.43)

$$Q_1 = 2\cdot 10^{\ 2}\cdot 25{,}5\cdot 10^{\ 2}\,\frac{(7400+2\cdot 2000)\cdot 2\cdot 6000}{4{,}08\cdot 10^{5}(4{,}5\cdot 10^{\ 2})^{2}} = 844\ \text{Н};$$

из (8.44)

$$Q_2 = (13-2)\cdot 10^{\ 2}\cdot 25{,}5\cdot 10^{\ 2}\,\frac{(7400+2\cdot 2000)\cdot 2\cdot 6000}{18{,}3\cdot 10^{5}(7{,}5\cdot 10^{\ 2})^{2}} = 373\ \text{Н};$$

сила тяжести добавочного полюса с обмоткой

$$G_{Д.П} = 9{,}81\cdot 22 = 216\ \text{Н};$$

из (8.45)

$$P' = (844+373+216)/0{,}2 = 7165\ \text{Н};$$

из (8.46)

$$P'' = \frac{13\cdot 10^{\ 2}}{0{,}54\cdot 10^{\ 2}}(0{,}9\cdot 850+0{,}7\cdot 373+0{,}5\cdot 216) = 7371\ \text{Н};$$

внутренний диаметр резьбы болта

$$d_{02} = \sqrt{\frac{4\cdot 7371}{3{,}14\cdot 2\cdot 600\cdot 10^{5}}} = 0{,}89\cdot 10^{\ 2}\ \text{м} = 8{,}9\ \text{мм};$$

можно выбрать болт М12 ($d_{02} = 10{,}106$ мм); для крепления главных и добавочных полюсов целесообразно выбирать одинаковые болты М16.

Полюсы синхронных машин чаще всего выполняются шихтованными. Листы для полюсов штампуются из электротехнической стали толщиной 0,5…1 мм — для машин небольшой мощности (до 100 кВт) и из марки Ст3 толщиной 1...2 мм — для более мощных машин.

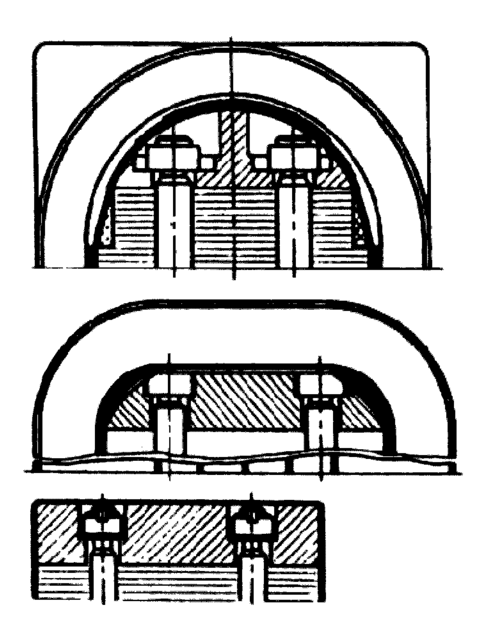


Рис. 8.30. Концевые щеки полюсов синхронных машин

Листы собираются в пакет, по краям которого укладываются щеки. В зависимости от ширины полюса щеки имеют различную форму (рис. 8.30). Пакет стягивается шпильками, пропущенными через отверстия, предусмотренные в листах сердечника. Гайки утапливаются в тело щек. Количество стяжных шпилек берется не менее четырех. Диаметр шпилек и их число определяются по (8.42) и выбираются таким образом, чтобы напряжение в них не превышало 60 МПа, а усилие, стягивающее сердечник, вызывало давление между листами около 2 МПа.

В машинах небольшой мощности полюсы болтами прикрепляют к валу или к напрессованной в него втулке (рис. 8.31).

Крепление полюсов в синхронных машинах мощностью свыше 100 кВт зависит от размеров ротора и частоты его вращения.

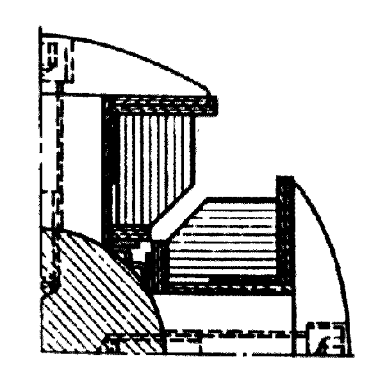


Рис. 8.31. Крепление полюсов синхронных машин небольшой мощности

В тихоходных машинах полюсы к ободу магнитного колеса прикрепляются с помощью болтов, которые вворачиваются в стержни, вставленные в тело полюса (рис. 8.32, *а*). В быстроходных машинах полюсы прикрепляются к остову ротора с помощью хвостов Т-образной формы (рис. 8.32, *б*), а в некоторых случаях в форме ласточкина хвоста (8.32, *в*). Т-образные хвосты более технологичны, поэтому они имеют преимущественное применение, за исключением машин с небольшим диаметром ротора. Размеры Т-образных хвостов и пазов для них нормализованы. В табл. 8.6, в соответствии с рис. 8.33, приведены размеры хвостов и нагрузки в них в зависимости от толщины листов. Хвосты в пазы расклиниваются клиньями из шпоночной стали с уклоном 1 : 100. При необходимости полюс выполняют с двумя хвостами, расстояние между которыми обозначено в таблице буквой k. При больших нагрузках тонкие листы шихтованного магнитопровода теряют устойчивость и коробятся. Для увеличения механической устойчивости хвоста его кромки иногда провариваются по специально выштампованным лункам.

Расчет крепления полюсов Т-образными хвостами в синхронных машинах производится путем сопоставления нагрузки на хвост с допустимой нагрузкой по табл. 8.6. Нагрузка на хвост обусловлена центробежной силой, которая определяется на единицу максимальной частоте вращения.

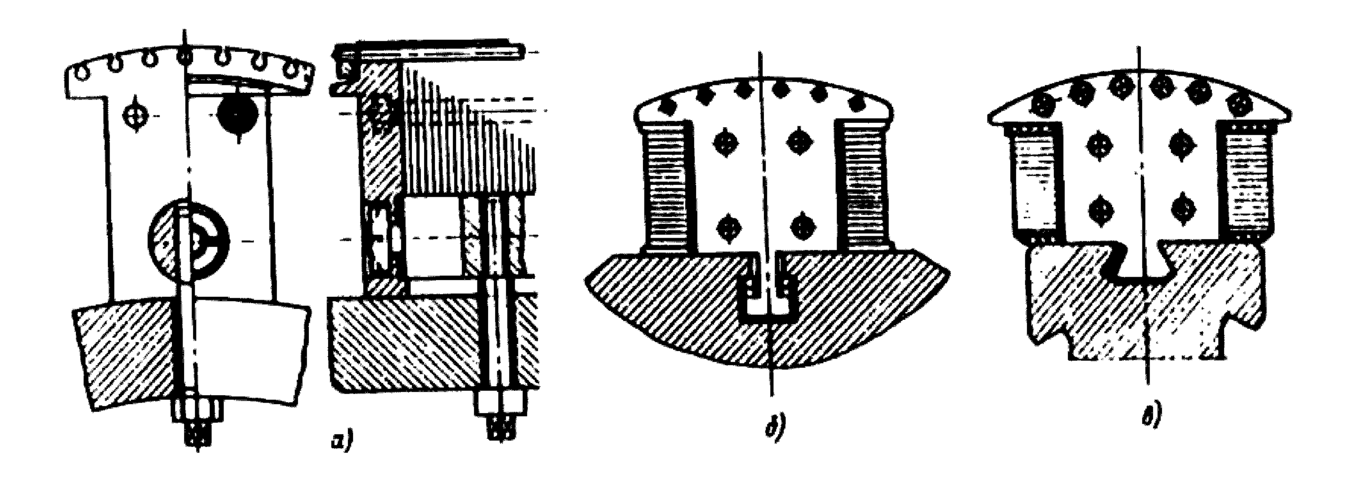


Рис. 8.32. Крепление полюсов синхронной машины большой мощности

Таблица 8.6. **Размеры паза**

№ хвоста	Размеры выступа, мм					Размеры паза, мм					Толщина листа, мм	Допустимая нагрузка, кН/м	
	a	b	c	e	k	r	g	m	h	n		Хвост не проварен	Хвост проварен
1	12	24	24	12	—	1	14	26	25	12	0,5 1	440 590	590 980
2	20	40	38	20	—	1,5	22	42	40	20	1 1,5	790 1470	1080 1960
3	26	52	50	25	80	1,5	29	55	52	25	1 1,5	690 2060	1080 2750
4	32	65	58	32	98	1,5	35	69	60	32	1 1,5	610 2160	1280 2850
5	38	70	58	32	110	1,5	42	74	60	32	1 1,5	520 2450	1170 3340

Центробежная сила полюса с обмоткой на 1 м длины полюса, Н/м,

$$C' = 11{,}0(m'_m + m'_{к.в})R\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \tag{8.48}$$

где R — средний радиус центра тяжести полюса (рис. 8.34), м, равный

$$R = H + 0{,}5h_{тр}, \tag{8.49}$$

где $m'_m, m'_{к.в}$ — массы полюса и катушки обмотки возбуждения на 1 м длины, кг/м; $n_{\max}$ — максимальная частота вращения (для синхронных машин общего назначения $n_{\max} = 1{,}2n_{ном}$).

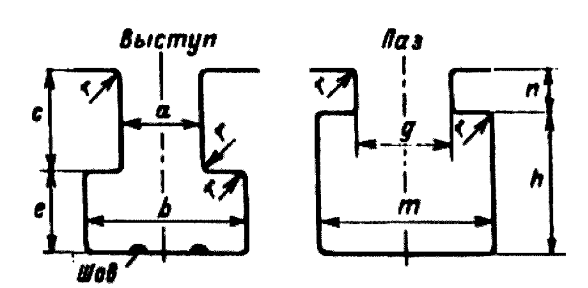


Рис. 8.33. Размеры паза и хвосты Т-образной формы

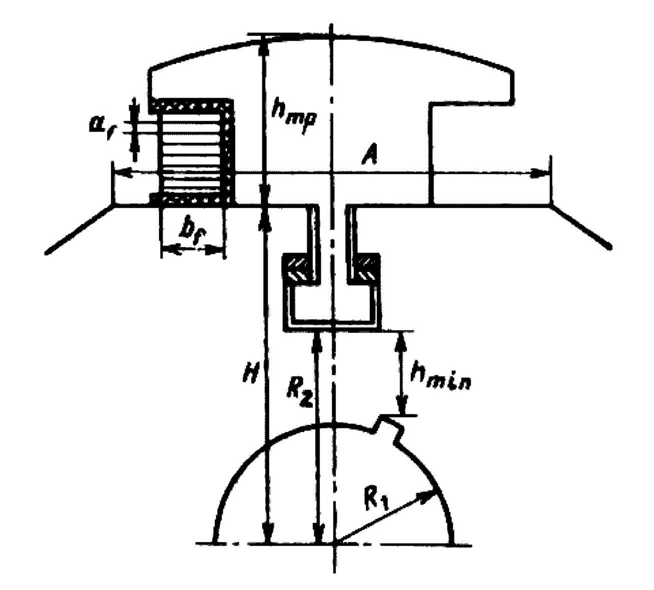


Рис. 8.34. Полюс с Т-образным хвостом

Масса катушки обмотки возбуждения на 1 м длины, кг/м,

$$m'_{к.в} = 2a_f b_f w_f \cdot 8900 \cdot 1{,}05 = 1{,}87 \cdot 10^4 a_f b_f w_f, \qquad (8.50)$$

где $a_f b_f$ — поперечное сечение проводника обмотки возбуждения, м^2; w_f — число витков в катушке; коэффициент 1,05 учитывает изоляцию проводника.

Масса полюса на 1 м длины, кг/м,

$$m'_m = 7800 S_m, \qquad (8.51)$$

где S_m — площадь поперечного сечения полюса с полюсным наконечником и хвостами, м^2; для предварительных расчетов площадь хвостов можно принимать равной 7% площади сердечника.

По найденной из (8.48) силе C'по табл. 8.6 выбирается тип хвоста. В том случае если полученная из расчета нагрузка на хвост превышает допустимую, полюс можно выполнять с двумя или большим числом хвостов. При учете возможной неравномерности распределения усилий между хвостами нагрузка на каждый из них по сравнению с табличной снижаются на 10% при двух хвостах и на 20% при трех.

Пример. Исходные данные: $n_{ном} = 600$ об/мин, $H = 41{,}9 \cdot 10^{\ 2}$ м, $h_{тр} = 21{,}5 \cdot 10^{\ 2}$ м, $S_m = 484 \cdot 10^{\ 4}$ м^2; $a_f = 0{,}28 \cdot 10^{\ 2}$ м, $b_f = 3 \cdot 10^{\ 2}$ м, $w_f = 46$, толщина листа 1,5 мм.

Из (8.50)

$m'_{к.в} = 1{,}87 \cdot 10^4 \cdot 0{,}28 \cdot 10^{\ 2} \cdot 3 \cdot 10^{\ 2} \cdot 46 = 72{,}3$ кг/м;

из (8.51)

$m'_m = 7800 \cdot 484 \cdot 10^{\ 4} = 377{,}5$ кг/м;

из (8.49)

$R = (41{,}9 + \frac{1}{2} 21{,}5) \cdot 10^{\ 2} = 52{,}65 \cdot 10^{\ 2}$ м;

из (8.48)

$C' = 11{,}0(377{,}5 + 72{,}3) \cdot 52{,}65 \cdot 10^{\ 2} \left(\frac{1{,}2 \cdot 600}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 1354{,}6$ Н/м

По табл. 8.6. для этой машины может быть выбран хвост № 2 без проварки основания.

Расчет крепления полюсов с помощью ласточкиных *хвостов.* Закрепление полюсов в ободе ротора с помощью выступов в виде ласточкина хвоста (см. рис. 8.32, *в*) применяют в машинах средней мощности, когда радиальная высота обода ротора может оказаться недостаточной для размещения паза Т-образной формы. Заклинивание хвостов производят двумя затяжными клиньями с уклоним 1 : 200, расположенными с боковой стороны хвоста.

В табл. 8.7 даны размеры нормализованных ласточкиных хвостов и пазов для них (обозначения см. на рис. 8.35).

Таблица 8.7. **Размеры ласточкина хвоста**

№ хвоста	Размеры хвоста, мм						Размеры паза, мм					Толщина листа, мм	Допустимая нагрузка, кН/м	
	b_1	b_2	h_1	h_2	h_3	r_1	b_3	b_4	h_4	h_5	r_2		Хвост не проварен	Хвост проварен
1	14	4,4	21	16,5	4,5	1,5	19,2	6,5	22	17,5	1,5	1 1,5	295 785	440 980
2	18	6,4	25	20,5	4,5	1,5	23,2	6,5	26,5	22	1,5	1 1,5	390 980	590 1280
3	22	8,4	29	24,5	4,5	2	27,2	6,5	30,5	26	2	1 1,5	490 1180	735 1570
4	27	10,9	34	29,5	4,5	2,5	32,2	6,5	36	31,5	2,5	1,5	1370	1870
5	33	13,9	41	36,5	4,5	3	38,2	6,5	43,5	39	3	1,5	1770	2350
6	40	17,4	49	44,5	4,5	4	45,2	6,5	51,5	47	4	1,5	2160	2850

Выбор хвоста производится так же, как и в предыдущем случае, исходя из рассчитанной по (8.48) нагрузки.

Расчет крепления полюса при помощи болтов. Число болтов для крепления полюса m_δ выбирается не менее двух. Для того чтобы не происходило удлинение болтов под действием центробежной силы при вращении ротора, болты ставят с предварительным натяг, который превышает центробежную силу на 20%.

Центробежная сила полюса при максимальной скорости, Н,

$$C_1 = 11{,}0 \cdot 10^3 m_n R (n_{\max}/1000)^2, \tag{8.52}$$

где m_n — масса одного полюса, равная сумме масс сердечника, обмотки возбуждения и демпферной (пусковой) обмотки (берется из электромагнитного расчета); R — по (8.49).

Внутренний диаметр резьбы болта, м,

$$d_0 = \sqrt{\frac{1{,}2 \cdot 4 C_1}{\pi m_\delta \sigma_{ДОП}}}. \tag{8.53}$$

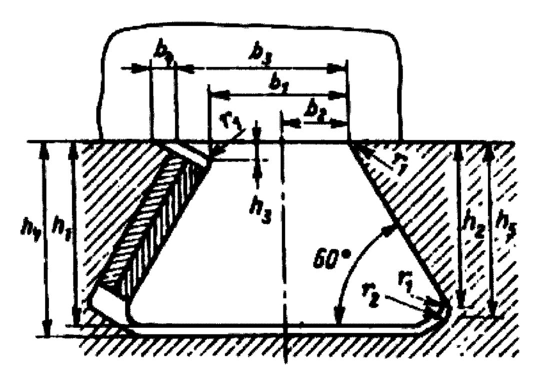


Рис. 8.35. Размеры паза и ласточкина хвоста

Допустимое напряжение $\sigma_{ДОП}$ для болтов из стали марок Ст5 и 30 составляет 120 МПа.

Пример. Исходные данные: $m_n = 106$ кг, $n_{ном} = 375$ об/мин, $H = 48{,}6 \cdot 10^{\ 2}$ м, $h_{тр} = 18{,}8 \cdot 10^{\ 2}$ м.

Из (8.49)

$R = (48{,}6 + 0{,}5 \cdot 18{,}8) \cdot 10^{\ 2} = 58 \cdot 10^{\ 2}$ м;

по (8.52)

$$C_1 = 11{,}0 \cdot 10^3 \cdot 106 \cdot 58 \cdot 10^{\ 2} \left(\frac{1{,}2 \cdot 375}{1000} \right)^2 = 135256 \text{ Н}.$$

Внутренний диаметр болта по (8.53)

$$d_0 = \sqrt{\frac{1{,}2 \cdot 4 \cdot 135256}{3{,}14 \cdot 2 \cdot 1200 \cdot 10^5}} = 2{,}94 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 29{,}4 \text{ мм}.$$

По диаметру $d_0 = 29{,}4$ мм выбирается ближайший по размеру болт М36 ($d_0 = 31{,}67$ мм).

Расчет межполюсных распорок. При вращении ротора на проводники обмотки возбуждения действует центробежная сила G_n направленная по радиусу ротора. Эту силу, приложенную к центру тяжести проводника, можно разложить на две составляющие, одна из которых направлена по продольной оси полюса, а другая — перпендикулярно этой оси (рис. 8.36). Продольная составляющая воспринимается полюсным наконечником, а поперечная составляющая стремится выгнуть проводник в межполюсное пространство. Поперечная составляющая одинакова для всех проводников катушки, т. е. не зависит от положения витка по высоте полюса. Напряжение на изгиб в медном проводнике катушки полюса, Па, определяют по формулам:

а) для катушки с двумя радиусами закругления (рис. 8.36)

$$\sigma_И = 0{,}49 \frac{2r + l}{2b_f} (2r + L)^2 \left(\frac{n_{\max}}{1000} \right)^2 k \cdot 10^8; \tag{8.54}$$

б) для катушки с одним радиусом закругления

$$\sigma_И = 0{,}98 \frac{r}{2b_f} (2r + L)^2 \left(\frac{n_{\max}}{1000} \right)^2 k \cdot 10^8. \tag{8.55}$$

Индексы в формулах соответствуют обозначениям на рис. 8.36. Значения r, l, L и b_f подставляются в метрах.

Уменьшение напряжений при увеличении отношения $\mu = r / L$, учитывают коэффициентом k (рис. 8.37).

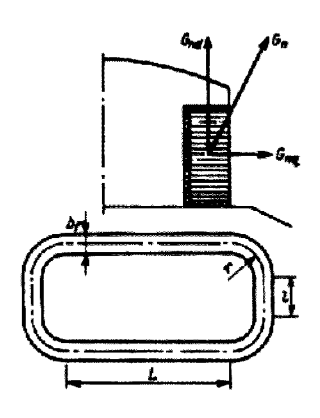


Рис. 8.36. К расчету межполюсных распорок

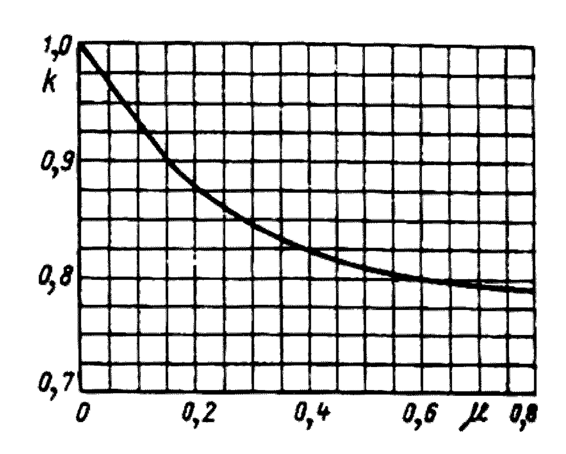


Рис. 8.37. Зависимость $k = f(\mu)$

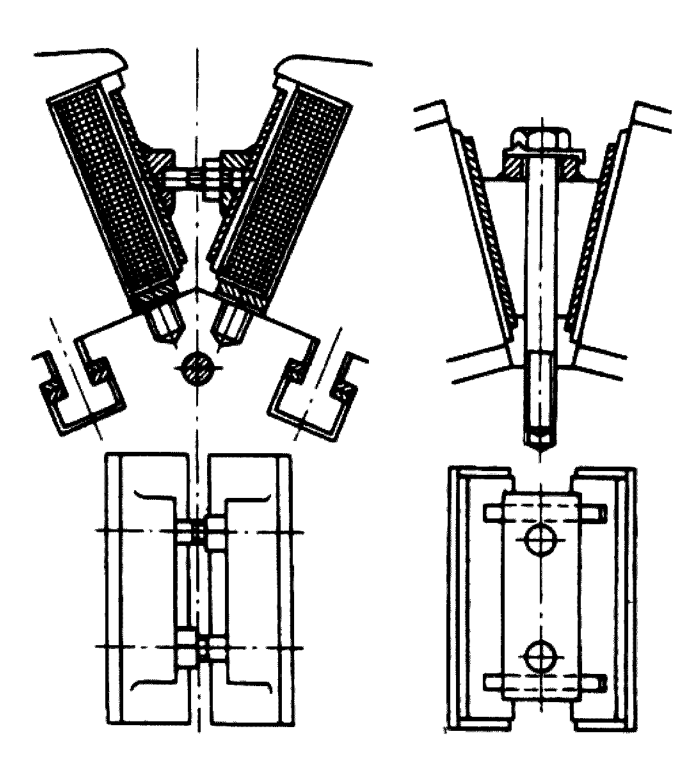


Рис. 8.38. Межполюсные распорки

Если напряжение на изгиб медного проводника, полученное по (8.54) или (8.55), меньше или равно 50 МПа, то межполюсные распорки можно не ставить. Если же $\sigma_И > 50$ МПа, то для укрепления обмотки между катушками следует поставить распорки (рис. 8.38).

Их количество по длине машины определяют по формуле

$$m_p = \sqrt{\sigma_И /(500\cdot 10^5)} - 1, \qquad (8.56)$$

m_p принимается равным ближайшему целому числу.

Напряжение в медном проводнике при наличии распорок, Па

$$\sigma_{пр} = \sigma_И /(m_p + 1)^2. \qquad (8.57)$$

Боковое давление на распорку, Н,

$$N = 0{,}981 a_f b_f w_f \left(\frac{2r + l}{2}\right)\left(\frac{2r + l}{m_p + 1}\right)\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)\cdot 10^8. \qquad (8.58)$$

Пример. Исходные данные: $n_{ном} = 750$ об/мин, $L = 66\cdot 10^{\ 2}$ м, $l = 17{,}7\cdot 10^{\ 2}$ м, $r = 5{,}95\cdot 10^{\ 2}$ м, $a_f = 0{,}21\cdot 10^{\ 2}$ м, $b_f = 3{,}5\cdot 10^{\ 2}$ м, $w_f = 65$, катушка — с двумя радиусами закругления.

$\mu = 5{,}95\cdot 10^{\ 2}/(66\cdot 10^{\ 2}) = 0{,}09$.

По рис. 8.37 $k = 0{,}93$.

Из (8.54)

$$\sigma_И = 0{,}49\frac{(2\cdot 5{,}95+17{,}7)\cdot 10^{-2}}{2\cdot 3{,}5\cdot 10^{-2}}(2\cdot 5{,}95+66)^2\cdot 10^{-4}\left(\frac{1{,}2\cdot 750}{1000}\right)\cdot 0{,}93\cdot 10^8 = 94{,}7 > 50 \text{ МПа}.$$

Определяем число распорок:

$$m_p = \sqrt{947\cdot 10^5/(500\cdot 10^5)} - 1 = 0{,}37;$$

принимаем $m_p - 1$, тогда

$$\sigma_{пр} = 940\cdot 10^5/(1+1)^2 = 234\cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Боковое давление на распорку по (8.58)

$$N = 0{,}98\cdot 0{,}21\cdot 10^{-2}\cdot 3{,}5\cdot 10^{-2}\cdot 65\left[\frac{(2\cdot 5{,}95+17{,}7)\cdot 10^{-2}}{2}\right]\times\left[\frac{(2\cdot 5{,}95+66)\cdot 10^{-2}}{1+1}\right]\left(\frac{1{,}2\cdot 750}{1000}\right)^2\cdot 10^8 = 21800 H.$$

Расчет кромки полюсного наконечника. Наиболее опасным сечением полюсного наконечника является сечение A A (по рис. 8.39). Кромка полюса испытывает изгибающий момент от центробежных сил обмотки и самой кромки. При наличии межполюсных распорок, опирающихся на кромку полюса, на нее будут также действовать моменты от сил бокового давления обмотки через распорку и от центробежной силы распорки. Поэтому при проектировании полюса, главным образом полюса быстроходных машин, необходимо проверить напряжение в кромке.

Центробежная сила 1 м обмотки, Н/м,

$$C_B = 10{,}3 a_f b_f w_f R_B\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^2\cdot 10^7. \quad (8.59)$$

Центробежная сила кромки полюса, Н/м,

$$C_{кр} = 11{,}0 m_{кр} R_к\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^2\cdot 10^3, \quad (8.60)$$

где $m_{кр}$ — масса кромки полюса, кг/м; R_B и $R_{кр}$ — расстояние от оси вращения до центра тяжести обмотки и кромки полюса, м; a_f и b_f — размеры проводника обмотки возбуждения, м.

Сила, действующая на 1 м от бокового давления обмотки через распорку, Н/м,

$$C_p = N\frac{tg\alpha}{B}, \quad (8.61)$$

где N — сила бокового давления на распорку по (8.58); $\alpha = 180^0/(2p)$ половина угла между полюсами;

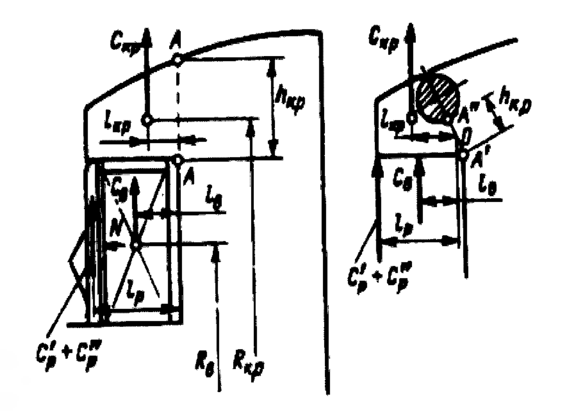


Рис. 8.39. Силы, действующие на кромку полюса

B — опорная на кромку длина (аксиальная) распорки, м.

Силы, действующие на 1 м кромки, от центробежной силы распорки, Н/м,

$$C''_p = C_p/(2B\cos\alpha), \tag{8.62}$$

где C_p — полная центробежная сила распорки, Н:

$$C_p = 11{,}0 m_p R_p \left(\frac{n_{\max}}{1000}\right) \cdot 10^3,$$

m_p — полная масса распорка, кг; R_p — расстояние от оси вращения до центра тяжести распорки, м.

Изгибающий момент в сечении A—A на единицу длины, Н·м/м,

$$M_и = C_B l_B + C_{кр} l_{кр} + (C'_p + C''_p) l_p, \tag{8.63}$$

где $l_B, l_{кр}, l_p$ — плечи сил до центра сечения A—A, м.

Напряжение от изгиба в кромке полюсного наконечника, Па,

$$\sigma_{кр} = 6M_и / h^2_{кр}, \tag{8.64}$$

где $h_{кр}$ — высота сечения A—A кроме полюса, м.

Допустимое напряжение в кромке от изгиба для стали марки Ст3 составляет 70 МПа при толщине листов полюса 1 мм и 100 МПа при толщине листов полюса 1,5 мм. При наличии демпферной обмотки допускаемые напряжения соответственно будут 90 и 130 МПа. Если в сечение A—A попадает отверстие для стержня демпферной (пусковой) обмоткой, то из высоты сечения следует вычесть высоту шлица и диаметр паза. При смещении паза плечи $l_B, l_{кр}$ и l_p следует брать до центра тяжести сечения $A'' - A'$, как показано на рис. 8.39, при этом высоту сечения принимают равной $A'' - A'$.

Пример. Исходные данные: $n_{ном} = 750$ об/мин, $a_f = 0{,}21 \cdot 10^{\ 2}$ м, $b_f = 3{,}5 \cdot 10^{\ 2}$ м, $w_f = 65, \alpha = 22{,}5^0$. $R_{кр} = 59{,}2 \cdot 10^{\ 2}$ м, $R_B = 48{,}5 \cdot 10^{\ 2}$ м, $C_p = 8900$ Н, $B = 8 \cdot 10^{\ 2}$ м, масса кромки $m_{кр} = 17{,}3$ кг/м, $N = 21800$ Н, $l_B = 2{,}2 \cdot 10^{\ 2}$ м, $l_{кр} = 2 \cdot 10^{\ 2}$ м, $l_p = 3{,}8 \cdot 10^{\ 2}$ м, $h_{кр} = 4{,}8 \cdot 10^{\ 2}$ м.

Из (8.59)

$$C_B = 10{,}3 \cdot 0{,}21 \cdot 10^{\ 2} \cdot 3{,}5 \cdot 10^{\ 2} \cdot 65 \cdot 48{,}5 \cdot 10^{\ 2} \left(\frac{1{,}2 \cdot 750}{1000}\right)^2 \cdot 10^7 = 193 \cdot 10^3 \text{ Н/м};$$

из (8.60)

$$C_{кр} = 11{,}0 \cdot 17{,}3 \cdot 59{,}2 \cdot 10^{\ 2} \left(\frac{1{,}2 \cdot 750}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 = 91{,}25 \cdot 10^3 \text{ Н/м};$$

из (8.61)

$$C'_p = 21800 \frac{0{,}41}{8 \cdot 10^{\ 2}} = 112 \cdot 10^3 \text{ Н/м};$$

из (8.62)

$$C''_p = \frac{8900}{2 \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}91} = 61{,}0 \cdot 10^3 \text{ Н/м}.$$

Изгибающий момент по (8.63)

$$M_и = 193 \cdot 10^3 \cdot 2{,}2 \cdot 10^{-2} + 91{,}5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} + (112 + 61) \cdot 10^3 \cdot 4{,}0 \cdot 10^{-2} = 129{,}56 \cdot 10^2 \text{ Н·м/м}.$$

Напряжение от изгиба в кромке по (8.64)

$$\sigma_{кр} = \frac{6 \cdot 129{,}56 \cdot 10^2}{4{,}8^2 \cdot 10^{-4}} = 337 \cdot 10^5 \text{ Па} < 90 \text{ МПа}.$$

Расчет козырька щеки полюса. На козырек щеки действует центробежная сила лобовой части обмотки возбуждения, которая стремиться его отогнуть. Наибольшее напряжение изгиба возникает в месте перехода козырька к нажимной части щеки (сечение *I I* на рис. 8.40 *а*). Момент центробежных сил лобовой части обмотки, имеющей один радиус закругления, Н·м,

$$M_ц = 10{,}3 a_f w_f R_B r_2^3 B (n_{\max}/1000)^2 \cdot 10^7; \quad (8.65)$$

для обмотки, имеющей двухрадиусное закругление (рис. 8.40, *б*), Н·м,

$$M_ц = 10{,}3 a_f w_f R_B (B r_2^3 + l k'^2)(n_{\max}/1000) \cdot 10^7, \quad (8.66)$$

где R_B — расстояние от оси вращения до центра тяжести сечения обмотки, м; l — длина прямолинейного участка лобовой части обмотки, м; B — по кривой рис. 8.40; $\cos\alpha = 1 - k'/r_2; l, k', r_2$, м, — по рис. 8.40.

Момент сопротивления козырька щеки в сечении *I – I*, м^3,

$$W = \frac{bh^2}{6}\varphi. \quad (8.67)$$

Здесь b и h, м, — по рис. 8.40; φ — по рис. 8.40 в зависимости от отношения h_1/h.

Напряжение изгиба в сечении *I – I* козырька щеки, Па,

$$\sigma_b = 1{,}15 M_b / W. \quad (8.68)$$

Коэффициент 1,15 учитывает увеличение напряжения от собственной центробежной силы козырька щеки.

Допустимое напряжение для стали марки Ст3 $\sigma_и = 120$ МПа, для стали марки Ст5 $\sigma_и = 150$ МПа.

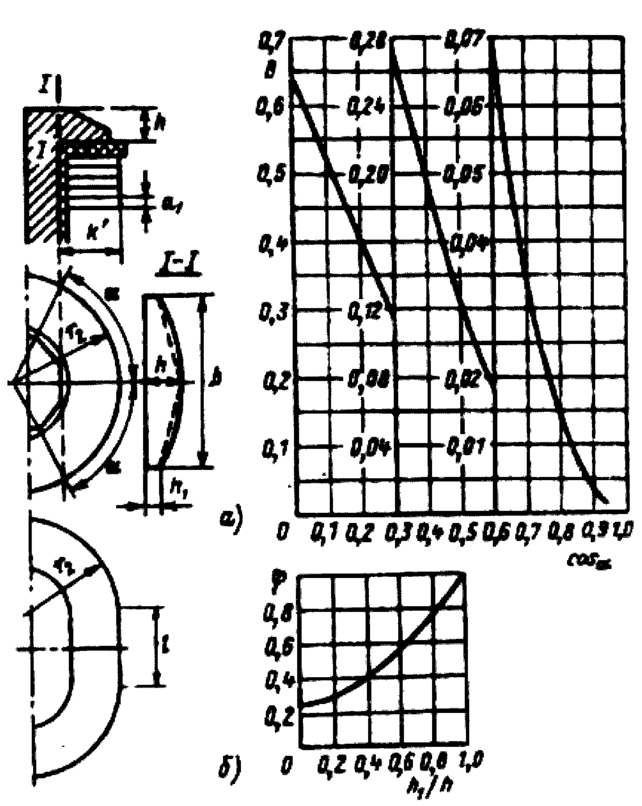


Рис. 8.40. К расчету козырька щеки полюса

Пример. Исходные данные: $n_{ном} = 750$ об/мин, $a_f = 0{,}21 \cdot 10^{\ 2}$ м, $w_f = 65$, $R_B = 48{,}5 \cdot 10^{\ 2}$ м, $r_2 = 7{,}5 \cdot 10^{\ 2}$ м, $l = 17{,}7 \cdot 10^{\ 2}$ м, $k' = 4{,}5 \cdot 10^{\ 2}$ м, $b = 25 \cdot 10^{\ 2}$ м. $h = 2{,}8 \cdot 10^{\ 2}$ м, $h_1 = 1{,}4 \cdot 10^{\ 2}$ м,

$$\cos\alpha = 1 - \frac{4{,}5 \cdot 10^{\ 2}}{7{,}5 \cdot 10^{\ 2}} = 0{,}4.$$

По рис. 8.40 $B = 0{,}2$.

Из (8.66)

$$M_u = 10{,}3 \cdot 0{,}21 \cdot 10^{-2} \cdot 65 \cdot 48{,}5 \cdot 10^{-2} \left(0{,}2 \cdot 7{,}5^3 \cdot 10^{-6} + \frac{17{,}7 \cdot 4{,}5^2 \cdot 10^{-6}}{2} \right) \left(\frac{1{,}2 \cdot 750}{1000} \right)^2 \cdot 10^7 = 14{,}5 \cdot 10^2 \text{ Нм};$$

из (8.67)

$$W = \frac{25 \cdot 10^{\ 2} \cdot 2.8^2 \cdot 10^{\ 4}}{6} \cdot 0.44 = 14.4 \cdot 10^{\ 6} \text{ м}^3$$

(при $h_1 / h = \frac{1{,}4 \cdot 10^{\ 2}}{2{,}8 \cdot 10^{\ 2}} = 0{,}5$ по рис. 8.40 $\varphi = 0{,}44$).

Напряжение изгиба по (8.68)

$$\sigma_u = \frac{1{,}15 \cdot 14{,}5 \cdot 10^2}{14{,}4 \cdot 10^{\ 6}} = 1158 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Расчет лобовой части катушки полюса. У машин относительно небольшой мощности или имеющих невысокую частоту вращения иногда центробежные силы, действующие на лобовые части обмотки возбуждения, получаются небольшими. В этом случае у щеки полюса можно не делать козырька, поддерживающего части обмотки. При решении вопроса о целесообразности установки щеки с козырьком или без него можно исходить из следующего расчета.

Статический момент площади лобовой части, м^3,

$$M = B_1 r_1^3 - B_2 r_2^3 + b_f l (r_2 - x + 0{,}5 b_f); \qquad (8.69)$$

при $l = 0$ $\qquad M = B_1 r_1^3 - B_2 r_2^3$,

где b_f — ширина проводника катушки, м; r_1, r_2, l, x, M — по рис. 8.41; B_1 и B_2 — коэффициенты, значение которых принимаются по рис. 8.41 по $\cos\alpha_2 = x / r_2$ для B_2 или $\cos\alpha_1 = x / r_1$ для B_1.

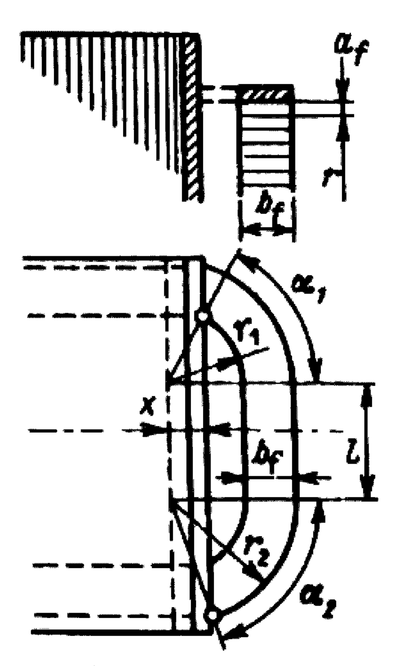


Рис. 8.41. Лобовая часть катушки полюса

Напряжение изгиба в меди от собственной центробежной силы, Па,

$$\sigma = 0{,}295 \frac{Mr}{b_f a_f} \left(\frac{n_{\max}}{1000} \right)^2 \cdot 10^9, \qquad (8.70)$$

где r — расстояние от оси вращения до наиболее удаленного витка, м; a_f — толщина проводника обмотки возбуждения, м.

Если расчетное напряжение изгиба меди превышает $500 \cdot 10^5$ Па, то применяют щеку с козырьком.

Пример. Исходные данные: $2p = 20$, $n_{ном} = 300$ об/мин, $a_f = 0{,}353 \cdot 10^{\ 2}$ м, $b_f = 1{,}68 \cdot 10^{\ 2}$ м, $r_2 = 4 \cdot 10^{\ 2}, r_1 = 5{,}68 \cdot 10^{\ 2}$ м, $r = 67{,}4 \cdot 10^{\ 2}$ м, $l = 5{,}2 \cdot 10^{\ 2}$ м, $x = 1{,}8 \cdot 10^{\ 2}$ м.

Из (8.69)

$$M = 0{,}26 \cdot 5{,}68^3 \cdot 10^{\ 6} - 0{,}158 \cdot 4^3 \cdot 10^{\ 6} + 1{,}68 \cdot 10^{\ 2} \cdot 5{,}2 \cdot 10^{\ 2} \cdot (4 - 1{,}8 + 0{,}5 \cdot 1{,}68) \cdot 10^{\ 2} = 63{,}6 \cdot 10^{\ 6} \text{ м}^3.$$

Для $\cos\alpha_2 = (1{,}8 \cdot 10^{\ 2})/(4 \cdot 10^{\ 2}) = 0{,}45$ и $\cos\alpha_1 = (1{,}8 \cdot 10^{\ 2})/(5{,}68 \cdot 10^{\ 2}) = 0{,}32$ по рис. 8.40 $B_2 = 0{,}158, B_1 = 0{,}26$.

Напряжение изгиба по (8.70)

$$\sigma = 0{,}295 \frac{63{,}6 \cdot 10^{\ 6} \cdot 67{,}4 \cdot 10^{\ 2}}{1{,}68 \cdot 10^{\ 2} \cdot 0{,}353 \cdot 10^{\ 2}} \left(\frac{1{,}2 \cdot 300}{1000} \right) \cdot 10^9 = 277 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

У данной машины можно применять щеку без козырька.

8.6. МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ МАГНИТОПРОВОДА РОТОРА СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

В синхронных машинах общего назначения мощностью свыше 100 кВт магнитопровод ротора имеет два вида исполнения. У быстроходных машин магнитопровод выполняется из отдельных дисков (рис. 8.42), которые затем стягиваются шпильками, либо заклепками, либо электросварочным швом. Полюсы к магнитопроводу крепятся с помощью хвостов. В тихоходных машинах ротор выполняется в виде магнитного колеса (рис. 8.43), к ободу которого шпильками прикрепляются полюсы.

При вращении ротора его магнитопровод испытывает растягивающее напряжение центробежной силы, обусловленной собственной силой тяжести и силой тяжести прикрепленных к нему полюсов. Для того чтобы центробежная сила не вызывала остаточной деформации в магнитопроводе, необходимо, чтобы максимальные напряжения были меньше или равны допустимым. Напряжения в магнитопроводе ротора определяют из расчета его на прочность.

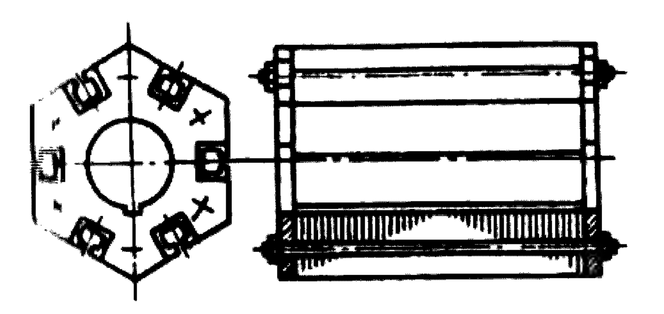


Рис. 8.42. Шихтованный ротор синхронной машины

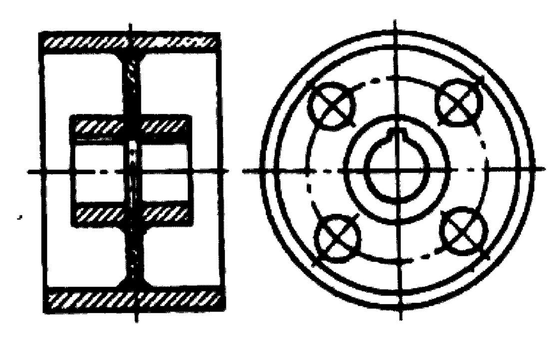


Рис. 8.43. Ротор синхронной машины в виде сварного магнитного колеса

8.6.1. Расчет дискового ротора

Магнитопровод ротора можно разбить на две части: собственно магнитопровод, ограниченный внутренним отверстием вала радиусом R_1 и окружностью радиусом R_2 (до дна пазов), и хвостовую зону, ограниченную внешним контуром сердечника и окружностью радиусом R_2 (см. рис. 8.34).

Масса хвостовой зоны на 1 м длины ротора, кг/м,

$$m'_x = 7800\left(2pA\frac{H}{2} - \pi R_2^2\right), \qquad (8.71)$$

где A, H, R_2, м, — по рис. 8.34.

Центробежная сила хвостовой зоны на 1 м длины, Н/м,

$$C_x = 11m'_x \frac{H + R_2}{2}\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3. \qquad (8.72)$$

Центробежная сила полюса с обмоткой на 1 м длины, Н/м,

$$C' = 11(m'_m + m'_{к.в})R\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^2, \qquad (8.73)$$

где m'_m и $m_{к.в}$ — массы полюса и катушки обмотки возбуждения на 1 м длины, кг/м, по (8.51) и (8.50); R — средний радиус центра тяжести полюса, м.

Радиальное напряжение на поверхности радиуса R_2, Па,

$$\sigma_p = (2pC' + C'_x)/(2\pi R_2). \qquad (8.74)$$

Максимальное тангенциальное напряжение, которое возникает на внутренней поверхности магнитопровода радиусом R_1, Па,

$$\sigma_T = \frac{2}{1-\alpha^2}\sigma_p + T_1 R_2^2\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^4, \qquad (8.75)$$

где T_1 — коэффициент, определяемый в зависимости от отношения $a = R_1 / R_2$ по следующей формуле:

$$T_1 = 72{,}4(1 + 0{,}212a^2) \cdot 10^2. \qquad (8.76)$$

Тангенциальное напряжение в стали магнитопровода ротора с учетом ослабления шпоночной канавкой, Па,

$$\sigma'_T = \sigma_T \frac{R_2 - R_1}{h_{\min}}. \qquad (8.77)$$

Если в магнитопроводе имеется отверстие для стяжной шпильки, то из $h_{\min}$ следует вычесть диаметр этого отверстия. Напряжение в стали магнитопровода σ'_T не должно превышать 130 МПа.

Пример. Исходные данные: $2p = 8$, $n_{ном} = 750$ об/мин, $A = 32{,}8 \cdot 10^{2}$ м, $H = 39{,}6 \cdot 10^{2}$ м, $R_1 = 13 \cdot 10^{2}$ м, $R_2 = 30{,}4 \cdot 10^{2}$ м, $R = 51{,}5 \cdot 10^{2}$ м, $m'_m + m'_{к.в} = 590$ кг/м, $h_{\min} = 16{,}5 \cdot 10^{2}$ м.

Из (8.71)

$$m_x = 7800\left(8 \cdot 32{,}8 \cdot 10^{-2}\,\frac{39{,}6 \cdot 10^{-2}}{2} - \pi 30{,}4^2 \cdot 10^{-4}\right) = 1789 \text{ кг/м};$$

по (8.72)

$$C'_x = 11 \cdot 1800\,\frac{(39{,}6 + 30{,}4) \cdot 10^{-2}}{2}\left(\frac{1{,}2 \cdot 750}{1000}\right) \cdot 10^3 = 5613 \text{ Н/м};$$

по (8.73)

$$C' = 11 \cdot 590 \cdot 51{,}5 \cdot 10^{\ 2}\left(\frac{1{,}2 \cdot 750}{1000}\right) \cdot 10^3 = 2707 \cdot 10^3 \text{ Н/м}.$$

Радиальное напряжение по (8.74)

$$\sigma_p = \frac{(8 \cdot 2707 + 5613) \cdot 10^3}{2\pi \cdot 30{,}4 \cdot 10^{-2}} = 142{,}8 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

По (8.76)

$$T_1 = 72{,}4\left[1 + 0{,}212\left(\frac{13}{30{,}4}\right)^2\right] \cdot 10^2 = 75{,}2 \cdot 10^2.$$

Тангенциальное напряжение по (8.75) и (8.77)

$$\sigma_T = \frac{2}{1 - (13/30{,}4)^2} \cdot 142{,}8 \cdot 10^5 + 75{,}2 \cdot 10^2 \cdot 30{,}4^2 \cdot 10^{-4}\left(\frac{1{,}2 \cdot 750}{1000}\right)^2 \cdot 10^4 = 405{,}9 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$\sigma'_T = 405{,}9 \cdot 10^5\,\frac{(30{,}4 - 13) \cdot 10^{-2}}{16{,}5 \cdot 10^{-2}} = 428 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

8.6.2. Расчет ротора в виде магнитного колеса

Магнитное колесо представляет собой сварную конструкцию, состоящую из стальной втулки, насаживаемой на вал, обода, к которому прикрепляются полюсы, и диска, соединяющего втулку и обод. Иногда в диске делают отверстия, между которыми образуются своеобразные спицы (рис. 8.44).

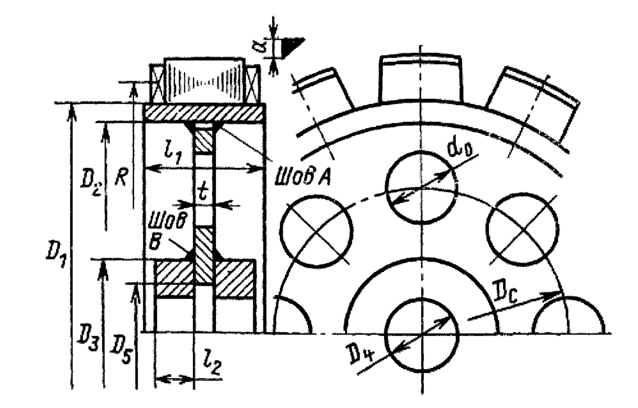


Рис. 8.44. К расчету ротора в виде сварного в виде сварного магнитного колеса

Центробежная сила обода, Н,

$$C_0 = 11 m_0 R_0 (n_{\max}/1000)^2 \cdot 10^3, \qquad (8.78)$$

где m_0 — масса обода, кг:

$$m_0 = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2) l_j \cdot 7800 = 6{,}12 \cdot 10^3 (D_1^2 - D_2^2) l_j; \qquad (8.79)$$

$R_0 = 0{,}25(D_1 + D_2)$ — средний радиус обода, м.

Центробежная сила полюсов с обмотками, Н,

$$C_n = 11 m_n R (n_{\max}/1000) \cdot 10^3, \tag{8.80}$$

где m_n — масса всех полюсов с обмотками, кг:

$$m_n = m_{M.B} + m_{M.C} + m_{M.кз} + m_m. \tag{8.81}$$

Массы $m_{M.B}, m_{M.C}, m_{M.кз}$ и m_m определяют из электромагнитного расчета по (10.150)—(10.153); R — радиус центра тяжести полюса с обмотками, м, по (8.49).

Сила, растягивающая втулку, Н,

$$N = (C_0 + C_n)/(am), \tag{8.82}$$

где a — расчетный коэффициент:

$$a = 1 + \frac{S_1}{R_0}\left(\frac{R_2}{S_2} + \frac{2\pi}{m}\frac{l_c}{S_c}\right); \tag{8.83}$$

$S_1 = 0{,}5(D_1 - D_2)l_j, S_2 = 0{,}5(D_3 - D_4)2l_2, S_c = b_c t$ — площади сечения обода, втулки, спицы, м^2; $b_c = \pi D_c / m - d_0$ — расчетная ширина спицы, м; m — число спиц; $R_2 = 0{,}25(D_3 + D_4)$ — средний радиус втулки; $l_c = 0{,}5(D_2 - D_3)$ — длина спицы; $D_1, D_2, D_3, D_4, D_c, d_0, t$ — размеры, м, по рис. 8.44.

Сила, передаваемая на втулку, Н,

$$Q = N\frac{(D_3 - D_4)l_2}{S_2}. \tag{8.84}$$

Напряжения при максимальной частоте вращения, Па:

в ободе на растяжение без учета спиц

$$\sigma_0 = \frac{C_0 + C_n}{2\pi S_1}; \tag{8.85}$$

во втулке

$$\sigma_{BT} = \frac{mN}{2\pi S_2}; \tag{8.86}$$

в швах A

$$\sigma_1' = \frac{N}{a_1 b_c}\frac{D_c}{D_2}; \tag{8.87}$$

в швах $Б$

$$\sigma_2' = \frac{mQ}{\pi(D_3 + D_5)a_2},$$

где a_1 и a_2 — размеры сварочных швов A и $Б$, м (рис. 8.44).

Можно принять

$$a_1 = a_2 = a \approx (1...1{,}5) \cdot 10^{-2} \text{ м}. \tag{8.88}$$

Напряжения при номинальной частоте вращения в швах *Б*, Па:
на растяжение

$$\sigma_2 = \sigma_2'(n_{ном} / n_{\max})^2; \tag{8.89}$$

на срез

$$\tau_2 = \frac{0{,}45 k_1 M_{ном} D_3}{a_2(D_3^3 - D_5^3)}, \tag{8.90}$$

где k_1 — коэффициент перегрузки; $k_1 = 1{,}7 - 2{,}5$;

$$M_{ном} = 9550 \frac{P_{ном}}{n_{ном}};$$

на срез (приведенное)

$$\tau_{пр} = \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_2^2 + 4\tau_2^2}. \tag{8.91}$$

Допустимые напряжения в ободе и втулке принимают равными до 100 МПа, в швах на растяжение 80 МПа, на срез 45 МПа.

Пример. Исходные данные: $P_{ном} = 800$ кВт, $n_{ном} = 500$ об/мин, $D_1 = 75{,}46 \cdot 10^{2}$ м, $D_2 = 64{,}46 \cdot 10^{2}$ м, $D_3 = 35 \cdot 10^{2}$ м, $D_4 = 21 \cdot 10^{2}$ м, $D_5 = 25 \cdot 10^{2}$ м, $D_c = 49{,}7 \cdot 10^{2}$ м, $l_j = 45 \cdot 10^{2}$ м, $l_2 = 13{,}3 \cdot 10^{2}$ м, $d_0 = 10 \cdot 10^{2}$ м, $t = 2{,}4 \cdot 10^{2}$ м, $R = 46 \cdot 10^{2}$ м, $m_п = 1080$ кг; $m = 4$.

Последовательно применяя (8.78)—(8.91), получаем

$m_0 = 6{,}12 \cdot 10^3 (75{,}46^2 \cdot 10^{4} - 64{,}46^2 \cdot 10^{4}) 45 \cdot 10^{2} = 423{,}8$ кг;

$R_0 = 0{,}25(75{,}46 \cdot 10^{2} + 64{,}46 \cdot 10^{2}) = 35 \cdot 10^{2}$ м;

$$C_0 = 11 \cdot 423{,}8 \cdot 35 \cdot 10^{2} \left(\frac{1{,}2 \cdot 500}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 = 587387 \text{ Н};$$

$$C_п = 11 \cdot 1080 \cdot 46 \cdot 10^{2} \left(\frac{1{,}2 \cdot 500}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 = 1967328 \text{ Н};$$

$S_1 = 0{,}5(75{,}46 \cdot 10^{2} - 64{,}46 \cdot 10^{2}) 45 \cdot 10^{2} = 247{,}5 \cdot 10^{4}$ м^2;

$R_2 = 0б25(35 \cdot 10^{2} + 21 \cdot 10^{2}) = 14 \cdot 10^{2}$ м;

$S_2 = 0{,}5(35 \cdot 10^{2} - 24 \cdot 10^{2}) 2 \cdot 13{,}3 \cdot 10^{2} = 186 \cdot 10^{4}$ м^2;

$$b_c = \frac{3{,}14 \cdot 49 \cdot 10^{2}}{4} - 10 \cdot 10^{2} = 29 \cdot 10^{2} \text{ м};$$

$l_c = 0{,}5(64{,}46 \cdot 10^{2} - 35 \cdot 10^{2}) = 14{,}73 \cdot 10^{2}$ м;

$S_c = 29 \cdot 10^{2} \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-2} = 69{,}6 \cdot 10^{4}$ м^2;

$$a = 1 + \frac{247{,}5 \cdot 10^{4}}{35 \cdot 10^{-2}} \left(\frac{14 \cdot 10^{2}}{186 \cdot 10^{-4}} + \frac{2\pi}{4} \frac{14{,}37 \cdot 10^{2}}{69{,}6 \cdot 10^{4}}\right) = 3{,}88;$$

$$N = \frac{587387 + 1967328}{3{,}88 \cdot 4} = 164608 \text{ Н};$$

$$Q = 164608 \frac{(35 \cdot 10^{2} - 21 \cdot 10^{2}) 13{,}3 \cdot 10^{2}}{186 \cdot 10^{4}} = 164785 \text{ Н};$$

$$\sigma_0 = \frac{587387 + 1967328}{2\pi \cdot 247{,}5 \cdot 10^{\ 4}} = 16{,}4 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_{BT} = \frac{4 \cdot 164608}{2\pi \cdot 186 \cdot 10^{\ 4}} = 5{,}64 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_1' = \frac{164608}{1 \cdot 10^{\ 2} \cdot 29 \cdot 10^{\ 2}} \frac{49{,}7 \cdot 10^{\ 2}}{64{,}46 \cdot 10^{\ 2}} = 43{,}76 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_2' = \frac{4 \cdot 164608}{\pi(35 \cdot 10^{\ 2} + 25 \cdot 10^{\ 2})1 \cdot 10^{\ 2}} = 34{,}9 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$\sigma_2 = 34{,}9 \cdot 10^6 \left(\frac{500}{1{,}2 \cdot 500}\right)^2 = 24{,}2 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$M_{ном} = 9550 \frac{800}{500} = 15280 \text{ Н·м};$$

$$\tau_2 = \frac{0{,}45 \cdot 2 \cdot 15280 \cdot 35 \cdot 10^{\ 2}}{1 \cdot 10^{\ 2}(35^3 \cdot 10^{\ 6} - 25^3 \cdot 10^{\ 6})} = 17{,}66 \cdot 10^6;$$

$$\tau_{пр} = \frac{1}{2}\sqrt{(24{,}2 \cdot 10^6)^2 + 4(17{,}66 \cdot 10^6)^2} = 21{,}4 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Все напряжения находятся в допустимых пределах.

8.7. РОТОРЫ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Магнитопроводы роторов асинхронных двигателей и Якорей машин постоянного тока с внешним диаметром менее 990 мм собирают из целых листов, которые вырубаются из электротехнической стали толщиной 0,5 мм (рис. 8.45). В листе штампуют пазы, а при необходимости, кроме того, круглые отверстия диаметр 15…35 мм для образования вентиляционных каналов. При большой радиальной высоте листа отверстия располагают в несколько концентрических рядов в шахматном порядке. Для посадки магнитопровода на вал в центре ли штампуются отверстие, в котором предусматривается шпоночная канавка, а также круглая лунка — шихтовочный знак *А*, для того чтобы при шихтовке укладывать все листы в одно и то же положение относительно друг друга. В результате такой укладки пазы получаются с более ровными стенками. После штамповки и снятия заусенцев листы лакируют и подвергают термообработке для создания оксидной пленки. При изготовлении роторов асинх-

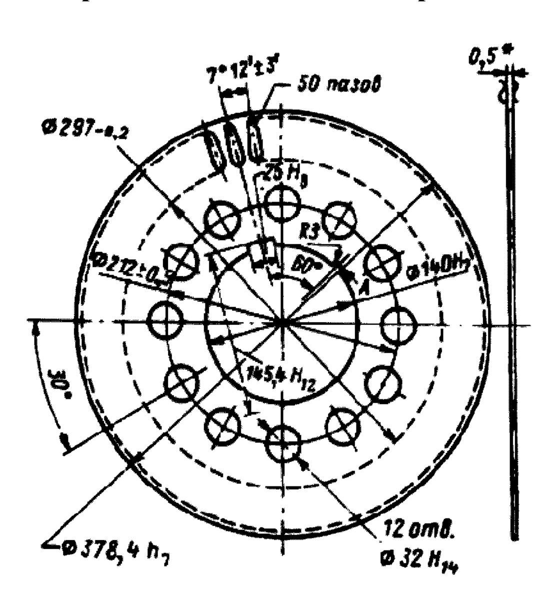


Рис. 8.45. Пример листа магнитопровода ротора

ронных двигателей с литой клеткой магнитопроводы сначала собирают из листов на оправке, а после заливки алюминиевой обмотки напрессовывают на вал. При внешних диаметрах ротора до 200...300 мм магнитопроводы сажают на гладкий вал горячей посадкой, а при больших диаметрах на валу предусматривается шпонка.

Магнитопроводы роторов, имеющие фазную обмотку или сварную клетку, а также магнитопроводы якорей машин постоянного тока набирают из листов непосредствен из вал (рис. 8.46).

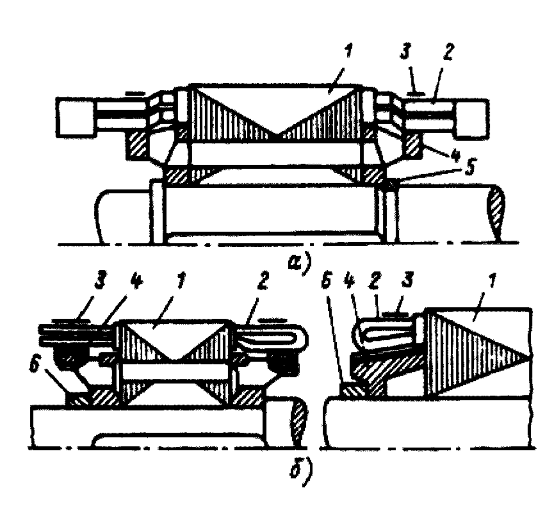


Рис. 8.46. Ротор (*а*) и якорь (*б*) из целых листов

Магнитопроводы 1 спрессовывают стальными нажимными шайбами, которые имеют кольцевые пояса 4, называемые обмоткодержателями и предназначенные для поддержки лобовых частей обмотки 2. Выполнение обмоткодержателей выбирается в соответствии с формой лобовых частей обмотки.

Магнитопровод ротора или якоря в спрессованном состоянии фиксируется на валу в осевом направлении или с помощью пружинит колец *5*, врезанных в канавку на валу, или втулок *6*, насаживаемых на вал с большим натягом. Иногда для фиксации магнитопровода с одной стороны упирается в предусмотренный на валу буртик. Лобовые части обмотки закрепляют бандажом *3*.

При внешнем диаметре ротора или якоря более 990 мм магнитопровод набирается из штампованных сегментов электротехнической стали (рис. 8.47). В этом случае сегменты набирают на ступицах, которые имеют сварную конструкцию (рис. 8.48). Размеры сегментов выбирают исходя из наилучшего раскроя листа. Для крепления в ступице в сегментах с внутренней стороны предусматривают выступы или углубления в форме ласточкина хвоста. Количество крепящих элементов в каждом сегменте должно быть не менее двух.

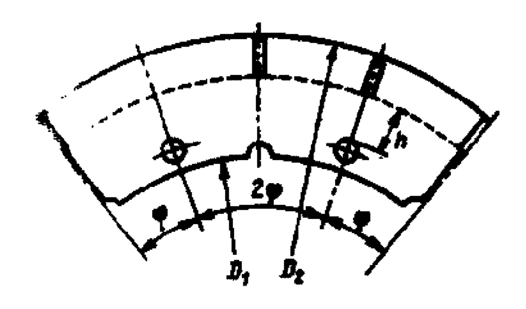
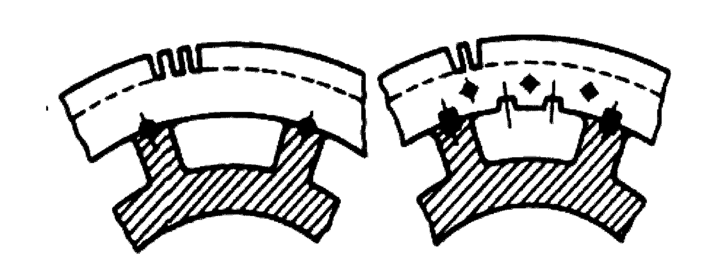


Рис. 8.47. Сегмент якоря


Рис. 8.48. Якорь из сегментов

В целях повышения механической прочности, а также улучшения магнитной проводимости пакеты собирают с перекрытием сегментов при переходе от слоя к слою.

В осевом направлении сегменты якоря стягивают нал фланцами и стяжными шпильками, устанавливаемыми внутри вне магнитопровода.

Иногда на ступицах собирают магнитопроводы роторов (якорей) при их диаметрах менее 990 мм. Такое выполнение магнитопроводов целесообразно в том случае, когда разность между внутренним диаметром ротора (якоря), найденным из электромагнитного расчета, и диаметром вала получается значительной, а внутреннюю меньшего диаметра.

8.7.1. Механический расчет магнитопровода

При проектировании роторов (якорей) отдельные их элементы подлежат проверке на механическую прочность.

Расчет напряжений в магнитопроводах. При вращении магнитопроводах роторов и якорей возникают напряжения от центробежных сил. Наибольшие значения эти напряжения имеют у внутренней поверхности магнитопровода:

$$\alpha = AD_2(n_{\max}/1000)^2\beta\cdot 10^5, \qquad (8.92)$$

где D_2 — диаметр ротора (якоря), м; β — коэффициент, учитывающий ослабление сечения листа шпоночной канавкой и вентиляционными отверстиями:

$$\beta = \frac{D_2 - 2h_n - d_\kappa}{2H_{\min}},$$

здесь h_n — глубина паза, м (рис. 8.49); d_κ — диаметр вентиляционного отверстия, м; $H_{\min}$ — минимальная высота ярма ротора (якоря), м:

$$H_{\min} = \frac{D_2 - d_B}{2} - h_{шп} - h_n - d_\kappa;$$

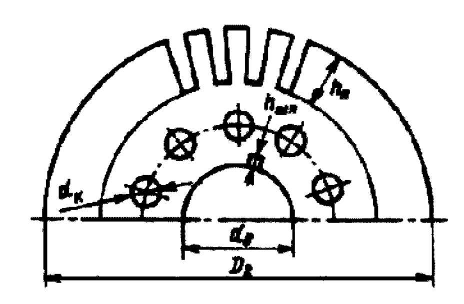


Рис. 8.49. к расчету напряжения в листе магнитопровода якоря

$h_{шп}$ — высота шпонки; d_B — диаметр вала.

Коэффициент A определяется по табл. 8.8., в которой принято

$$\varepsilon = h_n / D_2;$$

$$a = d_2/(D_2 - 2h_n).$$

Допустимое напряжение для электротехнической стали 120×10^6 Па.

Таблица 8.8. **Значение коэффициента *A***

a	ε							
	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
0,3	0,0201	0,0208	0,0216	0,0225	0,0236	0,0247	0,0262	0,0277
0,4	0,0208	0,0217	0,0227	0,0238	0,025	0,0263	0,0278	0,0296
0,5	0,0219	0,023	0,0241	0,0254	0,0269	0,0285	0,0304	0,0324
0,6	0,0237	0,0249	0,0265	0,0282	0,0300	0,032	0,0344	0,0369
0,7	0,0259	0,028	0,0303	0,0328	0,0354	0,0382	0,0414	0,044

Расчет колец и втулок, запирающих ротор (якорь) на валу. На кольцо, которым магнитопровод запирается на валу, действует усилие, сдвигающее нажимную шайбу вдоль оси. Это усилие, Н, вызывается упругостью спрессованного пакета и находится по формуле

$$Q = \frac{\pi}{4}(D_n^2 - d_в^2)q, \qquad (8.93)$$

где $D_n = D_2 - h_n$ — диаметр окружности, проведенной через середины пазов, м; q — упругость спрессованного пакета, берется как 1/3 усилия прессовки: $q = (0{,}5...1)\cdot 10^6$ Па. Большие значения q выбирают для машин меньшей мощности.

Напряжение на срез кольца прямоугольного сечения, Па,

$$\tau = Q/(\pi d_в b), \qquad (8.94\ а)$$

где b — ширина кольца, м.

Для кольца круглого сечения диаметром d_1

$$\tau = Q/(\pi d_в d_1). \qquad (8.94\ б)$$

Допустимое значение для колец, выполненных из стали, принимается равным $60\cdot 10^6$ Па.

Втулка, запирающая магнитопровод ротора (якоря) на валу, ниже находится под действием силы Q, определяемой по (8.93). Для предотвращения сдвига втулки на валу под действием этой силы необходимо, чтобы сила сцепления P втулки с валом превышала силу Q не менее чем в 1,2 раза. Сила P зависит от натяга, т. е. разницы внутреннего диаметра втулки и наружного диаметра пала. Необходимый натяг рассчитывается исходя из геометрических размеров вала, втулки и силы Q, а затем по «Единой системе допусков и посадок» выбирается стандартная посадка. В соответствии с выбранной посадкой устанавливаются допуски на изготовление вала и втулки. После этого уточняется усилие сдвига втулки и проверяется максимальное напряжение на втулке, которое не должно превышать допустимого значения для материала, из которого изготовлена втулка.

Расчет натяга и выбор посадки осуществляется в следующем порядке.

Определяется давление на посадочную поверхность, Па, формулы

$$p = \frac{P}{Sf} = \frac{1,2Q}{\pi d_в lf}, \qquad (8.95)$$

где f — коэффициент трения между сопрягающимися поверхностям (для сталей и чугунов в среднем $f = 0,1...0,15$); S — площадь посадочной поверхности, м^2: $S = \pi d_в l$ ($d_в$ и l — внутренний диаметр и длин втулки).

Затем определяется необходимый минимальный натяг, м:

$$\Delta_{\min} = pd_в / \Theta, \qquad (8.96)$$

где Θ — коэффициент.

Если вал и втулка изготовлены из стали, а вал не имеет отверстия, то

$$\Theta = \frac{E}{1 + (D_в^2 + d_в^2)/(D_в^2 - d_в^2)},$$

здесь E — модуль нормальной упругости (для сталей $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па); $D_в$ — наружный диаметр втулки, м.

По полученному значению натяга $\Delta_{\min}$ выбирается стандартная посадка, имеющая натяг, близкий к расчетному.

Максимальное напряжение на втулке определяется по формуле

$$\sigma = \frac{2p}{1 - (d_в / D_в)^2}. \qquad (8.97)$$

Значение p' определяется из (8.96) при максимальном натяге $\Delta_{\max}$.

Пример. Рассчитать втулку, запирающую магнитопровод якоря на валу. $D_н = 26,5 \cdot 10^{\ 2}$ м, $d_В = 8 \cdot 10^{\ 2}$ м, $D_В = 11,5 \cdot 10^{\ 2}$ м, $l = 3,5 \cdot 10^{\ 2}$ м и $q = 5 \cdot 10^5$ Па.

По (8.93)

$$Q = \frac{3,14}{4}(26,5^2 - 8^2) \cdot 10^{\ 4} \cdot 5 \cdot 10^5 = 25051 \text{ Н};$$

по (8.95)

$$p = \frac{1,2 \cdot 25051}{\pi \cdot 8 \cdot 10^{\ 2} \cdot 3,5 \cdot 10^{\ 2} \cdot 0,15} = 227,9 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Необходимый минимальный натяг из (8.96)

$$\Delta_{\min} = \frac{227,9 \cdot 10^5 \cdot 8 \cdot 10^{\ 2}}{5,43 \cdot 10^{10}} = 335,76 \cdot 10^{\ 7} \text{ м};$$

$$\Theta = \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{1 + \frac{(11,5^2 + 8^2) \cdot 10^{\ 4}}{(11,5^2 - 8^2) \cdot 10^{\ 4}}} = 5,43 \cdot 10^{10} \text{ Па}.$$

По стандарту выбираем посадку $80\dfrac{H_7\begin{pmatrix}+30\\0\end{pmatrix}}{l_6\begin{pmatrix}+94\\+75\end{pmatrix}}$ (допуски для вала $\begin{matrix}+94\\+75\end{matrix}$ мкм, а для втулки $\begin{matrix}+30\\0\end{matrix}$ мкм). При этой посадке минимальный натяг $\Delta_{\min} = 75 - 30 = 45$ мкм ($450\cdot 10^{-2}$ м), максимальный натяг $\Delta_{\max} = 94 - 0 = 94$ мкм ($940\cdot 10^{-7}$ м).

Уточняем давление на посадочную поверхность при минимальном натяге из (8.96):

$$p = \frac{450\cdot 10^{\ 7}\cdot 5{,}43\cdot 10^{10}}{8\cdot 10^{\ 2}} = 305{,}4\cdot 10^{5}\ \text{Па}.$$

Уточняем силу P по (8.95)

$$P = 305б4\cdot 10^{5}\pi\cdot 8\cdot 10^{-2}\cdot 3{,}5\cdot 10^{-2}\cdot 0{,}15 = 40276\ \text{Н};$$

$$P/Q = 40276/25051 = 1{,}61 > 1{,}2.$$

Давление при максимальном натяге

$$p' = \frac{940\cdot 10^{\ 7}}{8\cdot 10^{\ 2}}\cdot 5{,}43\cdot 10^{10} = 638\cdot 10^{5}\ \text{Па}.$$

Напряжение на растяжение в сечении втулки по (8.97)

$$\sigma = \frac{2\cdot 638\cdot 10^{5}}{1-\left[8\cdot 10^{\ 2}/(11{,}5\cdot 10^{\ 2})\right]^{2}} = 247{,}3\cdot 10^{6} < 0{,}7\cdot 360\cdot 10^{6}\ \text{Па}.$$

Проверка прочности зубцов. Зубцы магнитопровода нагружены центробежной силой, силами от собственного веса, а также от веса обмотки и изоляции, лежащих в пазу. Наиболее слабым в механическом отношении является сечение в основании зубца шириной b_Z. Напряжение растяжения в этом сечении, Па, определяется по формуле

$$\sigma = C_{nZ}/b_Z. \qquad (8.98)$$

Центробежная сила зубца и содержимого паза на 1 м длины якоря, Н/м,

$$C_{Zn} = 5{,}5(m'_Z + m'_{o.u})(D_2 - h_n)\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^{2}\cdot 10^{3}, \qquad (8.99)$$

где D_2, h_n — внешний диаметр ротора (якоря) и высота паза, м.

Масса зубца на 1 м длины якоря, кг,

$$m'_Z = 7{,}8 b_{Zcp} h_n k_c \cdot 10^{3}, \qquad (8.100)$$

где b_{Zcp} — средняя ширина зубца, м; k_c — коэффициент заполнения пакета сталью.

Масса меди обмотки и ее изоляции на 1 м длины якоря, кг,

$$m'_{o.u} = m'_o + m'_u = \left[8{,}9 q_a N_n + 2{,}5(b_n h_n - q_a N_n)\right]\cdot 10^{3}, \qquad (8.101)$$

где q_a — сечение проводника, м^2, N_n — число проводников в пазу; b_n — ширина паза, м.

Проверка прочности шпонок. Шпонки для фиксации магнитопровода обычно выбирают такого же сечения, что и на свободном конце вала. Они рассчитываются на смятие рабочих поверхностей исходя из наибольшего значения передаваемого момента. Наибольшее распространение получили призматические шпонки. Напряжение смятия, Па,

$$\sigma = \frac{kM_{ном}}{0{,}25 d_B h_{шп} l_{шп}}, \tag{8.102}$$

где $M_{ном}$ — номинальный момент, Н·м; $h_{шп}, l_{шп}$ — высота и длина шпонки, м.

Коэффициент перегрузки k выбирается равным в пределах 2—3.

В шпонках, изготовленных из стали марки Ст5, допустимое напряжение принимается приблизительно равным $150 \cdot 10^6$ Па.

8.7.2. Расчет бандажей и клиньев

В пазах роторов и якорей располагаются обмотки, на которые при вращении действуют центробежные силы. Для предотвращения перемещения в радиальном направлении обмотки должны быть надежно закреплены.

Лобовые части обмоток закрепляют бандажами, намотанными из проволоки или стекловолокна. Закрепление пазовой части обмотки посредством бандажей можно применять для машин постоянного тока относительно небольшой мощности (при диаметрах якоря до 300...350 мм), имеющих открытые пазы. Бандажи располагают в специальных канавках магнитопровода, которые образуются в результате применения листов меньшего диаметра, чем основные (рис. 8.50).

Применение бандажей имеет определенные преимущества, так как при этом уменьшается высота зубца, что приводит к уменьшению магнитного напряжения зубцов и потерь при их перемагничивании. Однако при больших скоростях (при v_a > 35 м/с) применение бандажей становится нерациональным, так как бандажи перекрывают чрезмерно большую поверхность якоря, что ухудшает его отдачу. При наличии проволочных бандажей из-за потерь в них понижается КПД машины, а при бандажах из магнитной проволоки ухудшается коммутация.

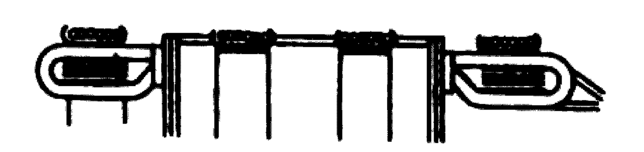


Рис. 8.50. Якорь машины постоянного тока с креплением обмотки бандажами

При наличии кольцевых канавок увеличивается воздушный зазор, а, следовательно, и магнитное напряжение зазора. Поэтому у более мощных машин обмотки в пазах закрепляют клиньями.

У асинхронных двигателей и машин постоянного тока имеющих на ро-

торе (якоре) полузакрытые пазы, крепление обмоток в активной части производят клиньями.

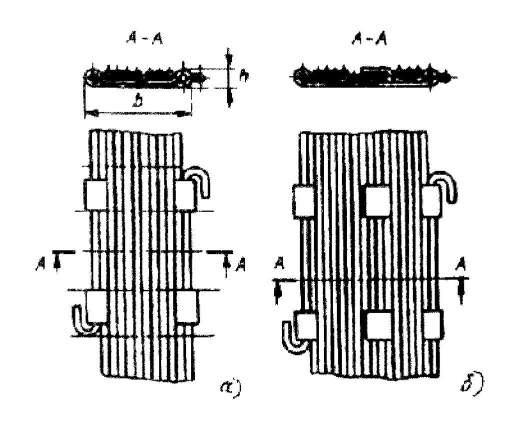


Рис. 8.51. Крепление концов проволоки бандажей якоря: *а* — на магнитопроводе; *б* — на лобовых частях обмотки

Расчет бандажей. Для бандажей применяют магнитную или стальную немагнитную проволоку или стеклоленту. При частотах перемагничивания более 50 Гц и в напряженных по коммутации машинах на активной части преимущественно применяют немагнитную проволоку. Диаметр проволоки для бандажей предварительно выбирают в пределах 0,8…2,0 мм (меньшие диаметры проволоки берут для машины с меньшим диаметром якоря).

Для уменьшения потерь бандаж делят на части, для чего по длине магнитопровода делают несколько канавок. Длину каждой канавки следует принимать не более 15.. .20 мм, а общая длина всех канавок не должна превышать 35% длины магнитопровода. На лобовых частях обмотки ширина бандажей может достигать 40 мм. Более широкие бандажи также следует делить на части или применять укладку в несколько слоев по высоте.

Под проволочными бандажами на пазовой и лобовой частях обмотки якоря подкладывают миканит толщиной 0,3. ..0,4 мм. Внешний диаметр установленных бандажей не должен превышать внешнего диаметра якоря. Для укрепления бандажей по ширине применяют скрепки из белой жести шириной 8. ..15 мм, припаиваемые оловянным припоем (рис. 8.51).

По сравнению с проволочными бандажи из стеклоленты, пропитанной синтетическими смолами, имеют преимущества. У них нет собственных потерь, они не требуют наложения изоляции между бандажом и обмоткой, менее трудоемки в изготовлении. Недостатком таких бандажей является их большая толщина, так как стеклолента имеет меньшую механическую прочность.

При расчете бандажа исходят из того, что он испытывает напряжение от центробежных сил обмотки и самого бандажа. Число витков проволочного бандажа

$$w_{\delta} = 1{,}13 \frac{m(D_2 - h_n)}{d_{\delta}(\sigma_{доп} - \sigma_0)} (n_{\max}/1000)^2 \cdot 10^3, \tag{8.103}$$

где d_{δ} — диаметр проволоки бандажа, м; $\sigma_{доп}$ — допустимое напряжение растяжения, принимаемое для стальной бандажной проволоки равным $450 \cdot 10^6$ Па;

$n_{\max}$ — максимальная частота вращения, об/мин; σ_0 — напряжение от центробежных сил бандажа, Па.

Для бандажей из стали

$$\sigma_0 = 2{,}2D_2^2(n_{\max}/1000)^2 \cdot 10^7, \qquad (8.104)$$

При определении числа витков бандажа, располагаемого на магнитопроводе, в (8.103) подставляют массу проводников m_0 и изоляции $m_и$ пазовой части обмотки, кг:

$$m = m_{о.и} = m_0 + m_и = m'_{о.и}Z_2 l, \qquad (8.105)$$

где Z_2 — число пазов якоря; l— полная длина магнитопровода якоря, м; $m'_{о.и}$ — по (8.101).

Для нахождения винтов бандажа с одной стороны лобовой части в (8.103) подставляют массу $m = m_Л$, кг:

$$m_л \approx 1{,}2 \cdot 0{,}7 \cdot 8{,}9 \cdot 10^3 q_a N_п Z_2 \tau, \qquad (8.106)$$

где $0{,}7\tau$ — длина лобовой части проводника, м; q_a — площадь поперечного сечения проводника, м^2; коэффициент 1,2 приближенно учитывает массу изоляции.

Число витков бандажа из стеклоленты определяют по формула

$$w_\delta = 0{,}9\frac{m(D_2 - h_п)}{d_\delta(\sigma_{доп} - \sigma_0)}(h_{\max}/1000)^2 \cdot 10^3, \qquad (8.107)$$

где $q_л$ — площадь поперечного сечения ленты, м^2; $\sigma_{доп}$ — допустимое напряжение растяжения, равное $150 \cdot 10^6$ Па для стеклоленты класса нагревостойкости B и $130 \cdot 10^6$ Па для класса F.

Для бандажей из стеклоленты, Па,

$$\sigma_0 = 0{,}51D_2^2(h_{\max}/1000) \cdot 10^7. \qquad (8.108)$$

Для бандажей используется лента ЛСБ (ТУ 6.11.22) толщиной 0,18. ..0,2 мм и шириной 10, 15, 20, 25, 30 мм. Высоту бандажных канавок на магнитопроводе якоря выбирают равной от 2 до 3,5 мм.

Пример. Двигатель постоянного тока имеет данные: $P_{ном} = 75$ кВт, максимальная эксплуатационная частота вращения (при ослаблении поля) 2200 об/мин, $D_2 = 25{,}8 \cdot 10^{\ 2}$ м, $l = 26{,}7 \cdot 10^{\ 2}$ м, $Z_2 = 27$, $N_п = 12, h_п = 3 \cdot 10^{\ 2}$ м, $b_п = 1{,}2 \cdot 10^{\ 2}$ м; $q_a = 16{,}5 \cdot 10^{\ 6}$ м^2, $q_л = 0{,}2 \cdot 10^{\ 2} \cdot 15 \cdot 10^{\ 3} = 3 \cdot 10^{\ 6}$ м^2.

Из (8.101)

$$m'_{о.и} = \left[8{,}9 \cdot 16{,}15 \cdot 10^{\ 6} \cdot 12 + 2{,}5(1{,}2 \cdot 10^{\ 2} \cdot 3 \cdot 10^{\ 2} - 16{,}15 \cdot 10^{\ 6} \cdot 12)\right] \cdot 10^3 = 2{,}140 \text{ кг.}$$

Масса пазовой части обмотки с изоляцией по (8.105)

$$m_{о.и} = 2{,}14 \cdot 27 \cdot 26{,}7 \cdot 10^{\ 2} = 15{,}4 \text{ кг.}$$

Напряжение от центробежных сил по (8.108)

$$\sigma_0 = 0{,}51 \cdot 25{,}8^2 \cdot 10^{\ 4}\left(\frac{1{,}2 \cdot 2200}{1000}\right)^2 \cdot 10^7 = 2{,}37 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

По (8.107)

$$w_\delta = 0{,}9\frac{15{,}4(25{,}8\cdot10^{-2}-3\cdot10^{-2})}{3\cdot10^{-6}(150\cdot10^{6}-2{,}37\cdot10^{6})}\left(\frac{1{,}2\cdot2200}{1000}\right)^2\cdot10^3 = 49{,}7\approx 50.$$

Расчет клиньев. Клинья изготовляют из гетинакса, текстолита, стеклотекстолита и дерева (бука, клена, ясеня). Клин рассчитывают на изгиб как балку с сосредоточенной нагрузкой посредине. Эта нагрузка равна центробежной силе пазовой части обмотки. Расчет производится на 1 м. Исходя из этого определяется предварительная высота клина $h_к$, (рис. 8.51), м:

$$h_к \ge 1{,}22\sqrt{C'b_к/\sigma_{доп}}. \tag{8.109}$$

Центробежная сила пазовой части обмотки на 1 м, Н/м,

$$C' = 5{,}5m'_{о.и}(D_2-h_п)\left(\frac{h_{\max}}{1000}\right)^2\cdot10^3,$$

где $m'_{о.и}$ — по (8.101); $b_к$ средняя ширина клина, м (рис. 8.52),

$$b_к \approx b_п + (1...3)\cdot10^{-3}.$$

Допустимое напряжение на изгиб $\sigma_{доп}$ для гетинакса равно 20 МПа, для текстолита — 35 МПа, для дерева при расположении волокон поперек паза — 8 и вдоль паза — 4 МПа.

По найденной высоте $h_к$ из табл. 8.9 подбирают нормализованные размеры клина. Приведенные в таблице размеры даны в соответствии с рис. 8.52. По производственным соображениям высота клина должна составлять не менее 0,256 $b_п$.

После выбора клина проводят поверочный расчет. Напряжение на изгиб, Па,

$$\sigma = 1{,}5C'b_к/h_к^2. \tag{8.110}$$

Напряжение на срез, Па,

$$\tau = 0{,}5C'/h_0, \tag{8.111}$$

где h_0 — в метрах по рис. 8.52 и табл. 8.9.

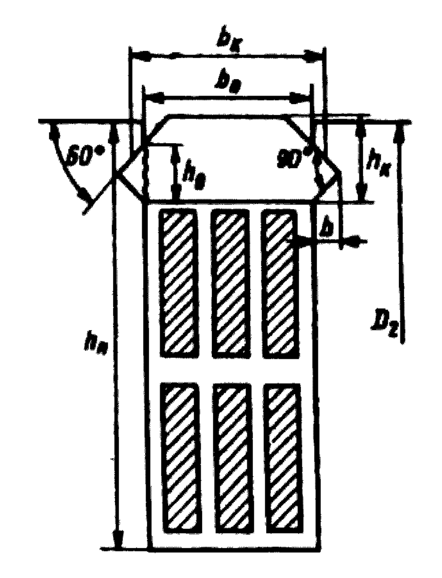


Рис. 8.52. К расчету пазового клина

Таблица 8.9. **Размеры клина**

$h_к$, мм	3	4	5	6	7	8
$b_к$, мм	$b_п$+1	$b_п$+1,2	$b_п$+1,8	$b_п$+2,3	$b_п$+2,9	$b_п$+3,2
h_0, мм	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7

Допустимое напряжение на срез для гетинакса равно 10 МПа, для текстолита — 15 МПа, для дерева при расположении волокон поперек паза — 4 и вдоль паза — 2 МПа.

Пример. Тот же двигатель, что и в предыдущем примере ($P_{ном} = 75$ кВт). Размеры паза $h_п \times b_п = 3{,}6 \cdot 10^{\;2} \cdot 1{,}2 \cdot 10^{\;2}$ м. Остальные данные те же.

Из (8.101)

$$m'_{о.и} = \left[8{,}9 \cdot 16{,}15 \cdot 10^{\;6} \cdot 12 + 2{,}5(1{,}2 \cdot 10^{\;2} \cdot 3{,}6 \cdot 10^{\;2} - 16{,}15 \cdot 10^{\;6} \cdot 12)\right] \cdot 10^{3} = 2{,}320 \text{ кг.}$$

Центробежная сила пазовой части обмотки

$$C' = 5{,}5 \cdot 2{,}320(25{,}8 \cdot 10^{-2} - 3{,}6 \cdot 10^{-2})\left(\frac{1{,}2 \cdot 2200}{1000}\right)^{2} \cdot 10^{3} = 19{,}74 \cdot 10^{3} \text{ Н/м.}$$

Материал клина — текстолит с $\sigma = 35$ МПа. Выбираем $b_к = 14 \cdot 10^{-3}$ м.

Из (8.109)

$$h_к \geq 1{,}22\sqrt{\frac{19{,}74 \cdot 10^{3} \cdot 14 \cdot 10^{\;3}}{350 \cdot 10^{5}}} = 3{,}43 \cdot 10^{\;3} \text{ м.}$$

По табл. 8.9 выбираем клин с $h_к = 4 \cdot 10^{-3}$ м; $b_к = 12 + 1{,}2 = 13{,}2$ мм; $h_0 = 3{,}5$ мм.

Проводим проверку:

По (8.110)

$$\sigma = 1{,}5\frac{19{,}74 \cdot 10^{3} \cdot 13{,}2 \cdot 10^{\;3}}{4^{2} \cdot 10^{\;6}} = 24{,}4 \cdot 10^{6} < 35 \cdot 10^{6} \text{ Па;}$$

по (8.111)

$$\tau = 0{,}5\frac{19{,}74 \cdot 10^{3}}{3{,}5 \cdot 10^{\;3}} = 2{,}82 \cdot 10^{6} < 15 \cdot 10^{6} \text{ Па.}$$

Выбранный клин имеет достаточную механическую прочность.

8.8. КОЛЛЕКТОРЫ

Коллектор является ответственной и сложной частью постоянного тока. Он состоит из коллекторных пластин, изготовляют из твердотянутой меди трапецеидального сечения толщиной 3...15 мм. Иногда для повышения механической прочности применяют пластины из меди с присадкой кадмия. Для медных пластин друг от друга между ними укладывают прокладки из специального коллекторного миканита толщиной 0,8...1,5 Набор коллекторных пластин с изоляцией между ними должен прочно закреплен и иметь строго цилиндрическую форму при режимах работы машины. Существующие конструкции коллекторов различают по способу крепления пластин и имеют большое многообразие. Здесь рассматриваются наиболее употребляемые в современных машинах способы крепления: нажимными конусными фланцами и конструкционной пластмассой.

При креплении нажимными конусными фланцами коллекторные пластины выполняют в виде ласточкина хвоста. Изоляционные прокладки между пластинами — такой же формы. Коллекторы с креплением нажимными

конусными фланцами делят на арочные и клиновидные. В первом случае нажим на пластины осуществляется только на ласточкин хвост (рис. 8,53, *а*), во втором — на ласточкин хвост и концы пластин (рис. 53, *б*).

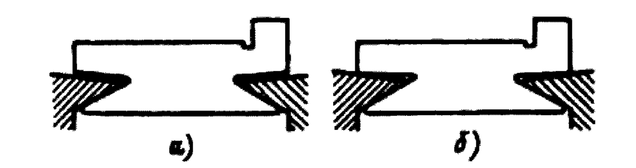


Рис. 8.53. Способы крепления коллекторных пластин

Наибольшее распространение получили арочные коллекторы, как более технологичные. На рис. 8.54 и 8.55 показаны конструкции таких коллекторов.

Ни рис. 8.54 нажимные фланцы *1*, надетые на втулку *2*, стягиваются кольцевой гайкой *3*. Для изоляции всех коллекторных пластин от корпуса на нажимные фланцы надевают прессованные из миканита манжеты *4*, а на втулку — миканитовый цилиндр *5*. Со стороны якоря у коллекторной пластины имеется выступ *6*, называемый петушком, в котором выфрезеровывается шлиц. В этот шлиц закладывают, а затем припаивают проводники обмотки якоря.

Рассмотренную конструкцию применяют при диаметрах коллекторов до 200...250 мм и малой длине. В коллекторах с общей длиной более 200 мм не рекомендуется применять затяжку фланцев кольцевой гайкой, так как в этом случае при нагреве пластин из-за температурной деформации происходит бочкообразный выгиб пластин.

Пример конструкции коллекторов с большими диаметрами показан на рис. 8.55. Здесь нажимные фланцы *1* стягивают стальными шпильками *2*. На фланцы надевают миканитовые манжеты *3*. При большой разнице в диаметрах якоря и коллектора в шлиц пластины впаивают медные полоски *4* — петушки, к которым присоединяют проводники якоря.

В коллекторах относительно небольших размеров (с внешним диаметром до 40...50 см) в настоящее время находит широкое применение крепление пластин

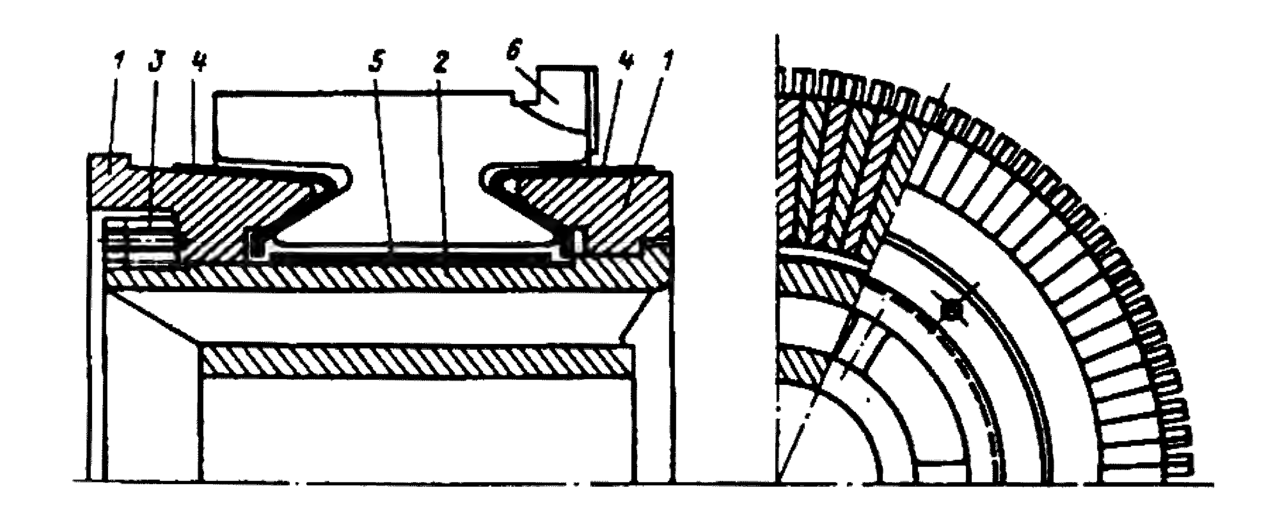


Рис. 8.54. Коллектор малых машин

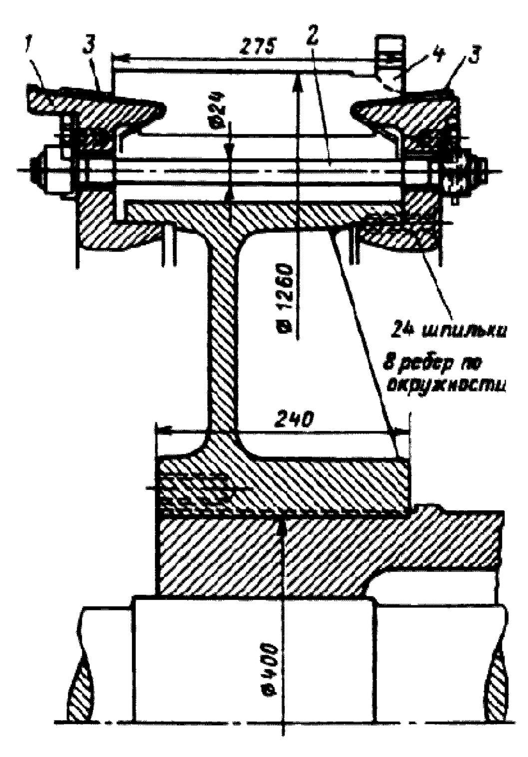


Рис. 8.55. Коллектор на пластмассе

пластмассами (рис. 8.56). По сравнению с креплением нажимными фланцами такие коллекторы более надежны в эксплуатации в отношении сохранения правильной цилиндрической формы, имеют меньшую трудоемкость изготовления и себестоимость за счет отсутствия механической обработки пластин на станке. Для посадки коллектора на вал внутри его предусматривают стальную втулку *1*, в которой для лучшего сцепления с пластмассой проточены кольцевые канавки. Пластмассу *2* впрессовывают в пространство между втулкой и коллекторными пластинами. Для этого применяют пластмассу марки К6 или АГ-4. В целях повышения механической прочности в углубления коллекторных пластин 3 вкладывают армировочные кольца *4*, выполненные из стальной проволоки или полосы. Размеры колец и число их витков зависят от диаметра коллектора. Показанная на рис. 8.5 конструкция коллектора применяется при их диаметрах до 25 см.

Внешний диаметр коллектора $D_к$, его общую длину $l_к$ и ширину коллекторного деления $b_к$ определяют из электромагнитного расчета. Ниже даны некоторые соотношения, позволяющие выбрать размеры коллекторных пластин (рис. 8.57).

Высоту коллекторной пластины принимают равной:

$$h_к \approx (0{,}80...1{,}15)\sqrt{D_к}\,. \qquad (8.112)$$

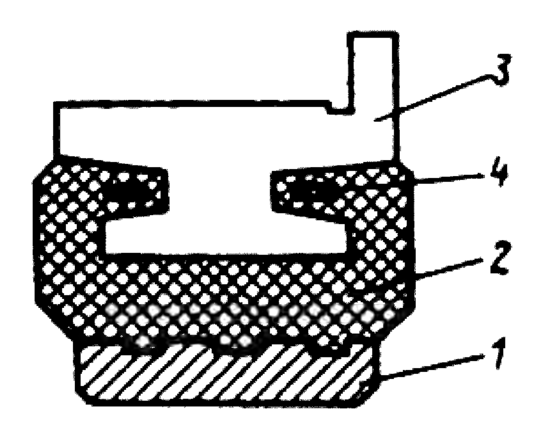


Рис. 8.56. Коллектор на пластмассе

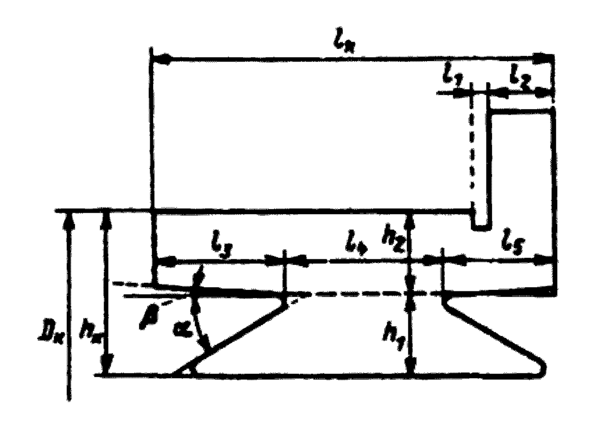


Рис. 8.57. Коллекторная пластина

Высота ласточкина хвоста

$$h_1 \approx (0{,}50...0{,}55)h_к. \qquad (8.113)$$

Дня равномерного распределения центробежных сил ласточкины хвосты стараются располагать несимметрично: $l_3 > l_5$. При выборе длины l_4 можно исходить из соотношения

$$l_4 \geq (1{,}2...1{,}6)h_1. \qquad (8.114)$$

Ширину выточки l_1, нужной для выхода шлифовального круга и фрезы при продорожке изоляции между пластинами, берут равной 6…8 мм.

Размер l_2 выбирается для якорей с многовитковыми секциями равной 12...15 мм, а для якорей с одновитковыми секциями 15…20 мм.

Толщина миканитовых манжет равна 1…1,5 мм, а миканитового цилиндра 0,75…1 мм.

Профиль ласточкина хвоста задается углами α и β, которые обычно применяются равными соответственно 30 и 3°. При диаметре коллектора менее 15 см эти углы принимаются равными 45 и 3°. Число шпилек для стягивания нажимных фланцев зависит от диаметра коллектора. При $D_к$ менее 50 см число шпилек выбирается в пределах от 6 до 12. Диаметр шпилек не рекомендуется брать менее 16 мм.

8.8.1. Механический расчет коллектора с нажимными конусными фланцами

Ниже дается упрощенная методика, позволяющая получить удовлетворительные результаты для большинства практических случаев.

В предлагаемой методике механического расчета коллектора проводится проверка напряжений в наиболее опасных сечениях пластины, стяжных болтах и миканитовой манжете. Опасными сечениями коллекторных пластин являются сечения *I*–*I II*–*II*, *III*–*III* (рис. 8.58).

При расчете напряжений в сечениях *I*–*I* и *II*–*II* консольную часть пластины рассматривают как балку с заделанным концом, на которую действует распределенная нагрузка. Распределенная нагрузка создается двумя силами: центробежной силой части пластины $C_к$ и радиальной составляющей силы арочного распора $F_к$, которая возникает в результате сжатия пластин нажимными фланцами.

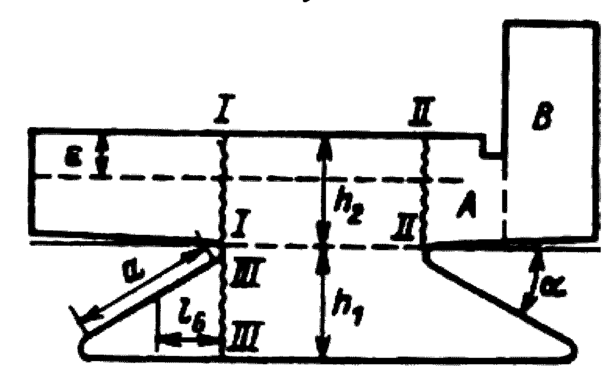


Рис. 8.58. К расчету коллектора

Консольные части пластины рассчитывают для изношенного коллектора. Радиальный износ ε можно принять до 20…40% h_2 (см. рис. 8.58).

Исходя из сказанного, напряжение изгиба в сечении *I I*, Па, находится по формуле

$$\sigma_{к1} = \frac{3}{2}\frac{l(C_{к1} + F_{к1})}{b_{к1}(h_2 - \varepsilon)^2}, \qquad (8.115)$$

где $b_{к1}$ — средняя толщина консольной части пластины, м:

$$b_{к1} = \frac{\pi(D_к - h_2 - \varepsilon)}{K} - b_и;$$

здесь $b_и$ — толщина миканитовой прокладки; K — число коллекторных пластин; $l_3, h_2, D_к$ — размеры, м, по рис. 8.57.

Центробежная сила $C_{к1}$, Н, определяется по формуле

$$C_{к1} = 11 m_{к1} R_{01} (n_{\max}/1000)^2 \cdot 10^3, \qquad (8.116)$$

где $R_{01} = (D_к - h_2 - \varepsilon)/2$ — радиус инерции консольной части, м; $m_{к1}$ — масса выступа (консольной части), кг:

$$m_{к1} = 8900 S_{к1} b_{к1};$$

$S_{к1}$ — площадь боковой поверхности выступа, м^2.

Радиальная составляющая силы арочного распора, Н,

$$F_{к1} = 2 p_0 S_{к1} \frac{\pi}{K}. \qquad (8.117)$$

Давление между пластинами p_0 выбирают таким, чтобы обеспечить сжатие миканитовых прокладок, при котором они не имели бы возможности перемещаться радиально. Это давление может быть определено по эмпирической формуле, Па,

$$p_0 = \left[60 + 5\left(\frac{n_{\max}}{1000}\frac{D_к}{10}\right)^{3/2}\right] \cdot 10^5, \qquad (8.118)$$

где $D_к$ диаметр коллектора, см.

Для сечения *II—II* напряжение подсчитывают аналогично (с учетом петушков). При расчете напряжения от растягивающих и сжимающих сил в сечении *III—III*, Па, уголок хвоста рассматривают как балку, заделанную в этом сечении и нагруженную сосредоточенной силой:

$$\sigma_x = \frac{3(C_x + F_{p.x}) l_\delta}{b_{к.x} h_1^2}, \qquad (8.119)$$

где $b_{к.x}$ — толщина пластины в средней части хвоста, м:

$$b_{к.х} = \frac{\pi(D_к - 2h_2 - h_1)}{K} - b_к;$$

$h_1, l_б$ — размеры, м, по рис. 8.58.

Центробежную C_x, и радиальную $F_{p.x}$ составляющие силы арочного рассчитывают по (8.116) и (8.117). При этом вместо массы $m_{к1}$ должна быть взята полная масса коллекторной пластины и вместо $S_{к1}$ — расчетная площадь боковой поверхности пластины. Радиус инерции берется равным $R_{0к} = (D_к - h_к)/2$. Напряжения σx, и $\sigma_к$ не должны превосходить 120 МПа. Напряжение сжатия в миканитовых манжетах, отнесенное к 1 м^2 площади прилегания манжеты к конусу с углом α, находят по формуле

$$\sigma_М = (C_x + F_{p.x})/(2b_{к.х} a \cos\alpha), \qquad (8.120)$$

где a — по рис. 8.58.

Напряжение сжатия не должно превосходить 50 МПа.

Сжатые болты рассчитывают, исходя из осевого давления, которое должны создать нажимные шайбы.

Напряжение в болтах на растяжение, Па,

$$\sigma_б = \frac{(C_x + F_{p.x})K tg\alpha}{1{,}56 d_б^2 m_б}, \qquad (8.121)$$

где d_δ — диаметр болта, м; m_δ — число болтов.

Значение не должно превышать 300 МПа.

Когда фланцы стягивают кольцевой гайкой, проверяют напряжение на срез витков резьбы гайки от силы запрессовки, Па:

$$\sigma_Г = \frac{(C_x + F_{p.x})K tg\alpha}{2\pi D_Г m_Г}, \qquad (8.122)$$

Напряжение не должно быть более 80 МПа.

При нагреве коллектора возникают дополнительные напряжения вследствие неодинакового расширения меди и стали. Эти напряжения учитывают путем умножения найденных выше напряжений и коэффициент 1,1...1,2.

Пример. Исходные данные: $D_к = 180 \cdot 10^{3}$ м, $h_к = 40 \cdot 10^{3}$ м, $h_1 = 20 \cdot 10^{3}$ м, $h_2 = 20 \cdot 10^{3}$ м, $\varepsilon = 6 \cdot 10^{3}$ м, $l_3 = 30 \cdot 10^{3}$ м, 297 $l_5 = 25 \cdot 10^{3}$ м, $l_6 = 10 \cdot 10^{3}$ м, $a = 20 \cdot 10^{3}$ м, $K = 81, b_и = 0{,}8 \cdot 10^{3}$ м, $S_к = 27б6 \cdot 10^{4}$ м^2, $S_{к1} = 5{,}7 \cdot 10^{4}$ м^2, $S_{к2А} = 1{,}8 \cdot 10^{4}$ м^2, $S_{к2В} = 5{,}1 \cdot 10^{4}$ м^2, $n_{max} = 1{,}2 \cdot 2200 = 2640$ об/мин, $H_Г = 10 \cdot 10^{3}$ м, $D_Г = 95 \cdot 10^{3}$ м

Из (8.118)

$$p_0 = \left[60 + 5\left(\frac{2640}{1000} \cdot \frac{18}{10}\right)^{3/2}\right] \cdot 10^5 = 11{,}2 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Сечение I I:

из (8.117)

$$F_{к1} = 2 \cdot 112 \cdot 10^5 \cdot 5{,}7 \cdot 10^{4} \frac{\pi}{81} = 495 \text{ Н;}$$

$$b_{к1} = \frac{\pi(180-20-6)\cdot 10^{-3}}{81} - 0{,}8\cdot 10^{-3} = 5{,}17\cdot 10^{-3}\ \text{м};$$

масса консольной части

$$m_{к1} = 8900\cdot 5{,}7\cdot 10^{-4}\cdot 5{,}17\cdot 10^{-3} = 26{,}2\cdot 10^{-3}\ \text{кг};$$

радиус инерции консольной части

$$R_{01} = \frac{(180-20-6)\cdot 10^{\ 3}}{2} = 77\cdot 10^{\ 3}\ \text{м};$$

центробежная сила по (8.116)

$$C_{к1} = 11\cdot 26{,}2\cdot 10^{-3}\cdot 77\cdot 10^{-3}\left(\frac{2640}{1000}\right)^2\cdot 10^3 = 155\ \text{Н};$$

напряжение изгиба по (8.115)

$$\sigma_{к1} = \frac{3}{2}\frac{30\cdot 10^{-3}(155+495)}{5{,}17\cdot 10^{-3}(20-6)^2\cdot 10^{-6}} = 28{,}86\cdot 10^6 < 120\cdot 10^6\ \text{Па}.$$

Сечение *II*   *II* (с учетом петушков, рис. 8.58):

$$F_{к2} = 2\cdot 112\cdot 10^5(1{,}8+5{,}1)\cdot 10^{-4}\frac{\pi}{81} = 599\ \text{Н};$$

центробежную силу определяем для двух участков консольной части (*А* и *В* на рис. 8.58):

$$m_{к2А} = 8900\cdot 1{,}8\cdot 10^{-4}\cdot 5{,}17\cdot 10^{-3} = 8{,}3\cdot 10^{-3}\ \text{кг};$$

$$C_{к2А} = 11\cdot 8{,}3\cdot 10^{-3}\cdot 77\cdot 10^{-3}(2640/1000)^2\cdot 10^3 = 49\ \text{Н};$$

$$m_{к2В} = 8900\cdot 5{,}1\cdot 10^{-4}\cdot 5{,}17\cdot 10^{-3} = 23{,}5\cdot 10^{-3}\ \text{кг};$$

$$C_{к2В} = 11\cdot 23{,}5\cdot 10^{-3}\cdot 88\cdot 10^{-3}(2640/1000)^2\cdot 10^3 = 158\ \text{Н},$$

где $R_{02В} = 88\cdot 10^{-3}$ м — радиус центра тяжести петушков; напряжение изгиба по (8.115)

$$\sigma_{к2} = \frac{3}{2}\cdot\frac{25\cdot 10^{-3}[(49+158)+599]}{5{,}17\cdot 10^{-3}\cdot(20-6)^2\cdot 10^{-6}} = 29{,}8\cdot 10^6 < 120\cdot 10^6\ \text{Па}.$$

Сечение *III*–*III*: из (8.117)

$$F_{р.х} = 2\cdot 112\cdot 10^5\cdot 27{,}6\cdot 10^{-4}\frac{\pi}{81} = 2397\ \text{Н};$$

$$b_{к.ср} = \frac{\pi(180-40)\cdot 10^{-3}}{81} - 0{,}8\cdot 10^{-3} = 4{,}63\cdot 10^{-3}\ \text{м};$$

$$m_{к.п} = 8900\cdot 27{,}6\cdot 10^{-4}\cdot 4{,}63\cdot 10^{-3} = 113{,}73\cdot 10^{-3}\ \text{кг};$$

$$R_{0к} = \frac{(180-40)\cdot 10^{-3}}{2} = 70\cdot 10^{-3}\ \text{м};$$

центробежная сила по (8.116)

$$C_х = 11\cdot 113{,}73\cdot 10^{\ 3}\cdot 70\cdot 10^{\ 3}\left(\frac{2640}{1000}\right)^2\cdot 10^3 = 609{,}5\ \text{Н};$$

$$b_{к.х} = \frac{\pi(180-2\cdot 20-20)\cdot 10^{-3}}{81} - 0{,}8\cdot 10^{-3} = 4\cdot 10^{-3}\ \text{м};$$

$$\sigma_х = \frac{3(609{,}5+2397)\cdot 10\cdot 10^{-3}}{4\cdot 10^{-3}\cdot 20^2\cdot 10^{-6}} = 56{,}4\cdot 10^6 < 120\cdot 10^6\ \text{Па};$$

напряжение сжатия в манжетах по (8.120)

$$\sigma_M = \frac{609{,}5 + 2397}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3}\sqrt{3/2}} = 21{,}7 \cdot 10^6 < 50 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

напряжение на срез резьбы гайки по (8.122)

$$\sigma_Г = \frac{(609{,}5 + 2397) \cdot 81 \cdot 1/\sqrt{3}}{2\pi \cdot 95 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 23{,}6 \cdot 10^6 < 80 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Коллектор имеет достаточную механическую прочность.

8.8.2. Механический расчет коллектора на пластмассе

При механическом расчете коллектора на пластмассе определяют напряжение в кольце из пластмассы, удерживающем пластину. Давление на кольцевой выступ пластмассового кольца, Па (рис. 8.59), определяется по формуле

$$q_B = \left[\frac{b_и \gamma_и}{2f - \alpha_M} \cdot \frac{2m^2}{D_0} + \frac{1}{1 - k_{з.м}}(S_{пл}\gamma_{пл} + S_к \gamma_м k_{з.м})\frac{E_и}{E_{пл}S_{пр}}(m^2 - 1) + \gamma_м k_{з.м}\right] \times$$

$$\times \frac{2{,}76 S_к D_0}{l_B}\left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3, \qquad (8.123)$$

где $b_и$ — толщина миканитовой прокладки, м; $\gamma_и = 2000$ кг/м^3; $\gamma_{пл} = 1800$ кг/м^3; $\gamma_м = 8900$ кг/м^3 — плотности миканита, пластмассы и меди; D_0 — диаметр окружности по центру тяжести коллекторных пластин, м; f — коэффициент трения меди по миканиту: $f = 0{,}05$; $\alpha_м = 2b_и / D_0$ — радианная мера толщины прокладок, рад; $S_{пл}$ — площадь поперечного сечения пластмассового кольца, м^2; $S_к$ — боковая площадь коллекторной пластины, м^2; $S_{пр}$ — приведенная площадь пластмассового кольца с учетом стальных колец, м^2; l_B — ширина кольцевого выступа, м:

$$S_{пр} = S_{пл} + 2\frac{E_{cT}}{E_{пл}} S_{ст};$$

$S_{СТ}$ — площадь поперечного сечения армирующего кольца, м^2; $E_и = 0{,}02 \cdot 10^{11}$ Па; $E_{пл} = 0{,}1 \cdot 10^{11}$ Па; $E_{cT} = 2{,}1 \cdot 10^{11}$ Па — модули упругости миканита, пластмассы и стали; m — коэффициент, равный отношению испытательной частоты вращения коллектора к максимальной частоте вращения якоря $n_{\max}$, принимают $m = 1{,}8$; $k_{з.м}$ — коэффициент заполнения коллектора медью:

$$k_{з.м} = 1 - \frac{Kb_и}{\pi(D_к - h_к)}.$$

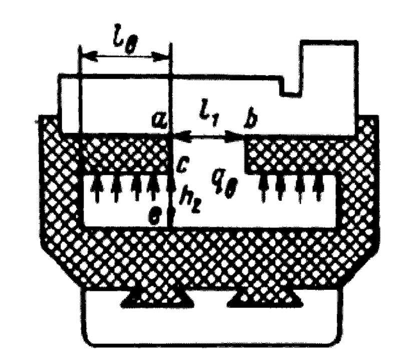


Рис. 8.59. К расчету коллектора на пластмассе

Напряжение растяжения всего кольца, вызванное радиальной деформацией, Па,

$$\sigma_{пл} = q_B l_B D_0 / S_{пр}. \qquad (8.124)$$

Предел прочности при растяжении составляет 20 МПа пластмассы К6 и 80 МПа для пластмассы АГ-4.

Прочность коллекторных пластин проверяется на напряжение в них от арочного распора F и центробежной силы C.

Консольные части пластин проверяют, так же как и в предыдущем случае, по (8.115). Кроме того, проверяется напряжение в сечениях $a-b$ и $c-e$ (рис. 8.59).

Напряжение растяжения пластины в сечении $a-b$, Па,

$$\sigma = (F_1 + C_1)/(b_к l_1), \qquad (8.125)$$

где $b_{к1}, l_1$ — толщина коллекторной пластины в сечении $a-b$ и длина хвостовой части пластины в этом сечении, м.

Силы C_1 и F_1 определяют по (8.116) и (8.117) соответственно для части пластины, расположенной выше линии ab.

Напряжение среза в сечении $c-e$. Па,

$$\tau = (F_x + C_x)/(2 b_{к2} h_2), \qquad (8.126)$$

где $b_{к2}, h_2$ средняя толщина и высота пластины в сечении $c-e$, м.

Силы C_x и E_x определяют для всей пластины.

Среднее давление между пластинами, обеспечивающее необходимый арочный распор, Па, определяют по формуле

$$p_0 = \left[\frac{b_и \gamma_и}{2f - \alpha_М} + \frac{1}{1-k_{з.м}}(S_{пл}\gamma_{пл} + S_к \gamma_м k_{з.м} + S_к \gamma_и (1-k_{з.м}))\cdot\frac{D_0 E_и}{2E_{пл} S_{пр}}\right] \times 5{,}5 D_0 \left(\frac{n_{\max}}{1000}\right)^2 \cdot 10^3 .$$

(8.127)

Пример. Исходные данные: $D_к = 125\cdot 10^{-3}$ м, $h_к = 30\cdot 10^{\ 3}$ м, $b_и = 70{,}8\cdot 10^{-3}$ м, $S_к = 17{,}8\cdot 10^{-4}$ м^2, $S_{пл} = 13\cdot 10^{-4}$ м^2, $S_{cT} = 0{,}05\cdot 10^{-4}$ м^2, $K = 93, D_0 = 102\cdot 10^{\ 3}$ м, $l_B = 15\cdot 10^{\ 3}$ м, $m = 1{,}8, m_{\max} = 1{,}2\cdot 3000$ об/мин, $h_2 = 8\cdot 10^{\ 3}$ м.

Коэффициент заполнения коллектора медью

$$k_{з.м} = 1 - \frac{93\cdot 0{,}8\cdot 10^{\ 3}}{\pi(125-30)\cdot 10^{\ 3}} = 0{,}751 .$$

Приведенная площадь пластмассового кольца

$$S_{пл} = 13\cdot 10^4 + 2\frac{2{,}1\cdot 10^{11}}{0{,}1\cdot 10^{11}}\cdot 0{,}05\cdot 10^{\ 4} = 15{,}1\cdot 10^{\ 4} \text{ м}^2.$$

Из (8.123)

$$q_B = \left[\frac{0{,}8\cdot 10^{-3}\cdot 2000}{2\cdot 0{,}05 - \frac{2\cdot 0{,}8\cdot 10^{-3}}{102\cdot 10^{-3}}}\cdot\frac{2\cdot 1{,}8^2}{102\cdot 10^3} + \frac{1}{1-0{,}75}(13\cdot 10^{-4}\cdot 1800 + 17{,}8\cdot 10^{-4}\cdot 10^{-4}\cdot 8900\cdot 0{,}75)\times\right.$$

$$\left.\times\frac{0{,}02\cdot 10^{11}(1{,}8^2-1)}{0{,}1\cdot 10^{11}\cdot 15{,}1\cdot 10^{-4}} + 8900\cdot 0{,}75\right]\times\frac{2{,}76\cdot 17{,}8\cdot 10^{-4}\cdot 102\cdot 10^{-3}}{15\cdot 10^{-3}}\left(\frac{1{,}8\cdot 1{,}2\cdot 3000}{1000}\right)^2\cdot 10^3 = 20{,}7\cdot 10^6 \ Па$$

Из (8.124)

$$\sigma_{пл} = \frac{20{,}7 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 102 \cdot 10^{-3}}{15{,}1 \cdot 10^{-4}} = 20{,}97 \cdot 10^6 < 80 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Давление между пластинами по (8.127)

$$p_0 = \left[\frac{0{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 2000}{2 \cdot 0{,}05 - \dfrac{2 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3}}{102 \cdot 10^{-3}}} + \frac{1}{1 - 0{,}75} \left[13 \cdot 10^{-4} \cdot 1800 + 17{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-4} \cdot 8900 \cdot 0{,}75 + 17{,}8 \cdot 10^{-4} \times \right. \right.$$

$$\left. \left. \times 2000(1 - 0{,}75) \right] \cdot \frac{102 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}02 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{11} \cdot 15{,}1 \cdot 10^{-4}} \right] \cdot 5{,}5 \cdot 102 \cdot 10^{-3} \left(\frac{1{,}8 \cdot 1{,}2 \cdot 3000}{1000} \right)^2 \cdot 10^3 = 10{,}07 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Из (8.117)

$$F_x = 2 \cdot 10{,}7 \cdot 10^6 \cdot 17{,}8 \cdot 10^{-4} \frac{\pi}{93} = 1286{,}1 \text{ Н.}$$

Средняя толщина коллекторной пластины

$$b_{к0} = \frac{\pi(125 - 30) \cdot 10^{-3}}{93} - 0{,}8 \cdot 10^{-3} = 2{,}4 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Средняя толщина пластины в сечении $c - e$ (рис. 8.59)

$$b_{к2} = \frac{\pi(125 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 30 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-3}) + 8 \cdot 10^{-3}}{93} - 0{,}8 \cdot 10^{-3} = 1{,}66 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Масса пластины

$$m_к = 8900 \cdot 17{,}8 \cdot 10^{-4} \cdot 2{,}4 \cdot 10^{-3} = 38 \cdot 10^{-3} \text{ кг.}$$

Из (8.116)

Напряжение среза в сечении $c - e$ по (8.126)

$$\tau = \frac{1286 + 895}{2 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 82 \cdot 10^6 < 120 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Коллектор имеет достаточную механическую прочность.

8.9. КОНТАКТНЫЕ КОЛЬЦА

Контактные кольца применяют в синхронных машинах и асинхронных двигателях с фазным ротором. Они располагаются на валу машины, и к ним подсоединяют обмотку ротора. У синхронных машин устанавливают два кольца, а у асинхронных — три. К контактным кольцам синхронных машин через неподвижные щетки подсоединяют источник питания для обмотки возбуждения, а в асинхронных двигателях пусковой или регулировочный резистор. Контактные кольца или располагают между магнитопроводом ротора и подшипниковым щитом, или выносят за подшипниковый щит. Наиболее часто применяют последнюю конструкцию, так как в этом случае можно выполнять оба подшипниковых щита одинаковыми, кроме того, устраняется опасность попадания на обмотки щеточной пыли.

Материалом для колец служат сталь, чугун, латунь или медь. На рис. 9.5 показана конструкция узла контактных колец для асинхронных двигателей.

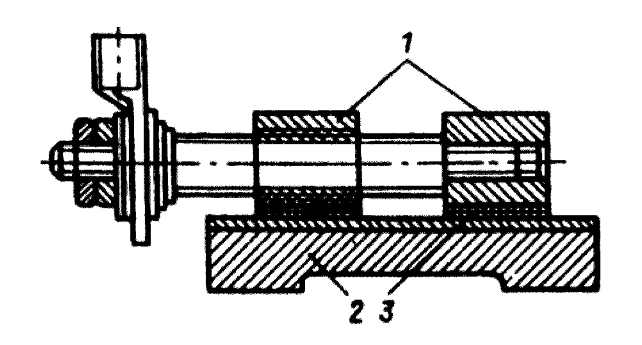


Рис. 8.60. Контактные кольца на втулке

На рис. 10.2 приведена конструкция узла колец для синхронных двигателе СДН2.

У машин относительно небольшой мощности контактные кольца *1* в холодном или горячем состоянии напрессовывают на втулку *2*, расположенную на валу (рис. 8.60). Для изоляции колец применяют наложенный в несколько слоев формовочный миканит *3* толщиной 0,5...0,7 мм. При внешнем диаметре до 100 мм контактные кольца иногда выполняют на пластмассе.

Для машин большой мощности применяют кольца с болтовым креплением (рис. 8.61). Контактные кольца *1* изолированы друг от друга и от болтов *3* изоляционными трубками *2*. Весь узел прикрепляют к торцу вала *4*. Эта конструкция имеет сравнительно небольшую массу, хорошее охлаждение колец, но она менее надежна в отношении прочности крепления и биения.

Механический расчет контактных колец производят в целях определения напряжения в них от действия центробежной силы. Расчет производится для колец после их предельного износа. Предельный диаметральный износ принимают: 8 мм для колец диаметре до 100 мм, 12 мм для диаметров 100...250 мм и 16 мм для диаметров свыше 250 мм.

Центробежная сила кольца, Н,

$$C_к = 11 m_к R_к (n_{\max}/1000)^2 \cdot 10^3, \quad (8.128)$$

где $m_к$ — масса кольца, кг; $R_к$— средний радиус кольца, м; $n_{\max}$ — максимальная частота вращения, об/мин.

Напряжение на растяжение в опасном сечении (сечение кольца ослабленное отверстием для контактной шпильки), Па,

$$\sigma = C_к/(2\pi S_к), \quad (8.129)$$

где $S_к$ — площадь сечения кольца, м^2:

$$S_к = \left(\frac{D_{из} - D_B}{2} - d_0\right) b_к, \quad (8.130)$$

$D_{из}$ — внешний диаметр кольца после износа, м; D_B, d_0 — внутренний диаметр кольца и диаметр отверстия под шпильку, м; $b_к$ — ширина кольца, м.

Напряжения в контактных кольцах, напрессованных на втулку, должны быть рассчитаны с учетом натяга при прессовой посадке по (8.97). Допускаемые напряжения не должны превышать 150 МПа для стальных колец и 75 МПа для латунных.

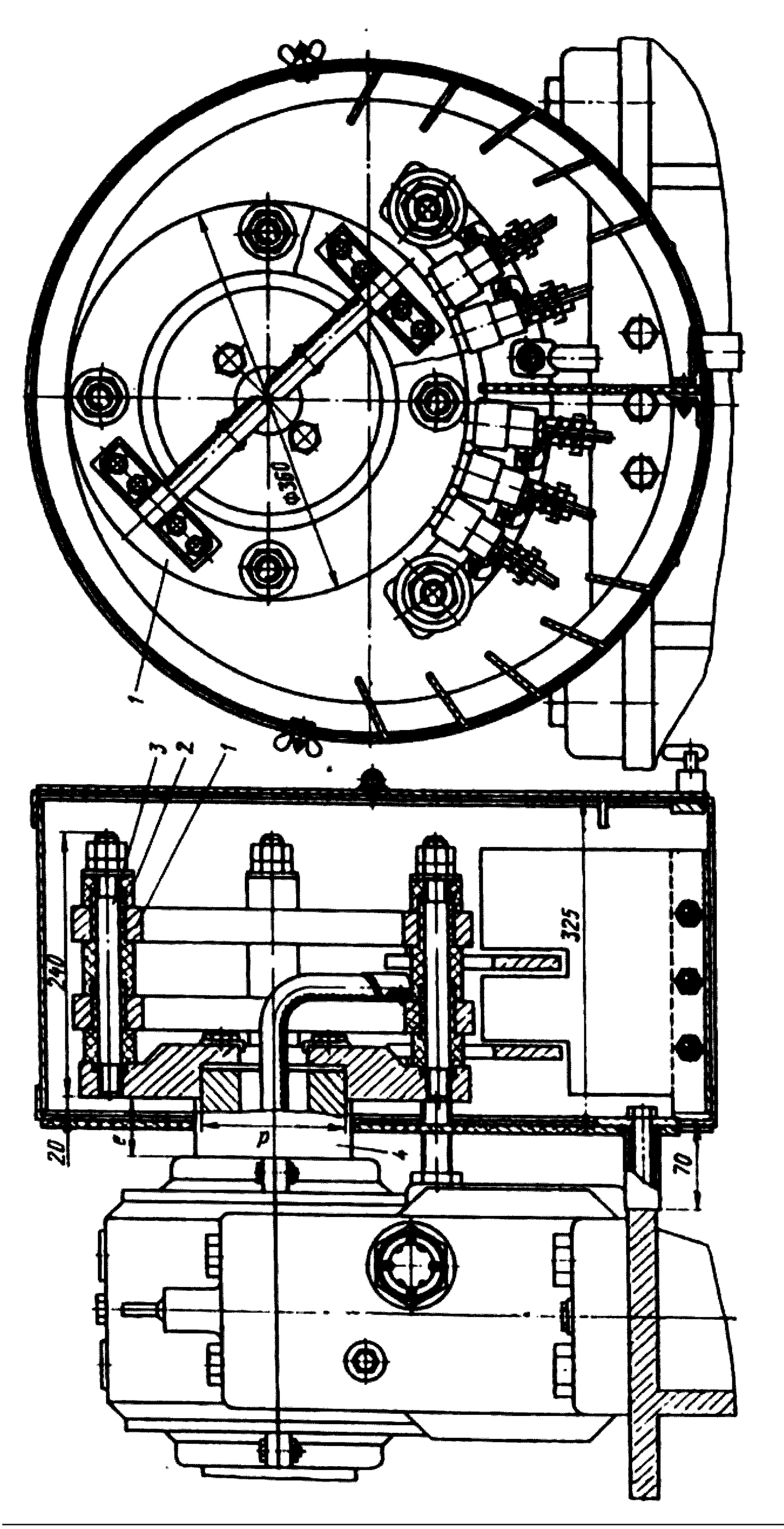


Рис. 8.61. Контактные кольца с болтовым креплением

8.10. ТОКОСЪЕМНЫЙ АППАРАТ

Токосъемный аппарат, предназначенный для съема тока с коллектора или с контактных колец, состоит из щеток, щеткодержателей, щеточных пальцев и траверсы. На рис. 8.62 показаны некоторые из возможных конструкций щеткодержателей.

Щетки для электрических машин прессуют из угольных и графитных порошков. Электрические свойства щеток и стандартизованные их размеры приведены в приложении 5. Для отвода тока в щетки заделываются гибкие плетеные канатики *4*, которые вторыми своими концами посредством припаянных к ним наконечников соединяют к неподвижной части щеткодержателя. Щетки *2* устанавливают в обойму щеткодержателя *1*. Щеткодержатели выполняют из латуни литыми или штампованными. Для того чтобы осуществить плотный контакт с коллектором или контактными кольцам на щетки с помощью пружины *3* осуществляется давление, которое выбирается равным 0,02...0,04 МПа. Щеткодержатели укрепляют на щеточных пальцах с помощью колодок *5*. На щеточном пальце обычно размещают несколько щеткодержателей. Наиболее распространенным видом щеткодержателей являются радиальные (рис. 8.62, *а*), у них направление щетки совпадает с продолжением радиуса коллектора. Такие щеткодержатели применяют для реверсивных машин, так как условия работы щеток не зависят от направления вращения. На рис. 8.63 показана еще одна конструкция радиального щеткодержателя.

Для машин одностороннего вращения чаще находят применение реактивные щеткодержатели (см. рис. 8.62, *б*), достоинство которых заключается в том, что при определенном нажиме и угле наклона щетка не упирается в обойму и скользит в ней без трения.

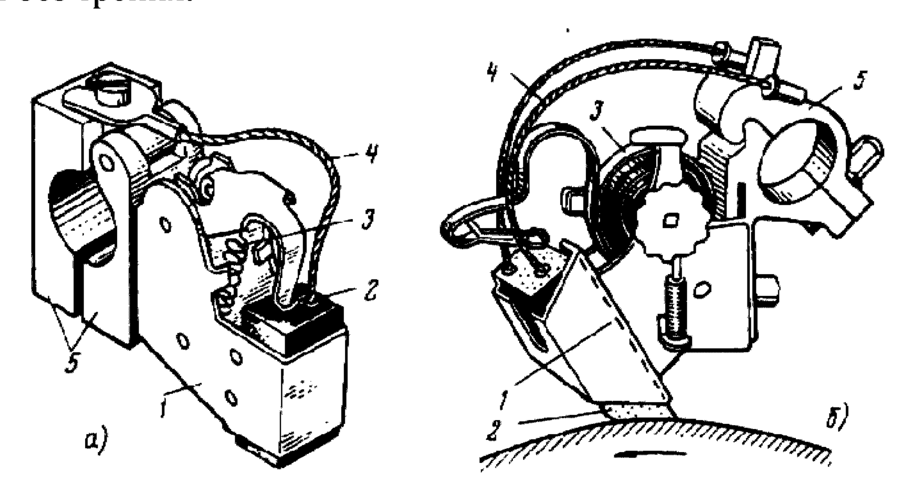


Рис. 8.62. Щеткодержатели машин постоянного тока:
а — радиальный; *б* — реактивный

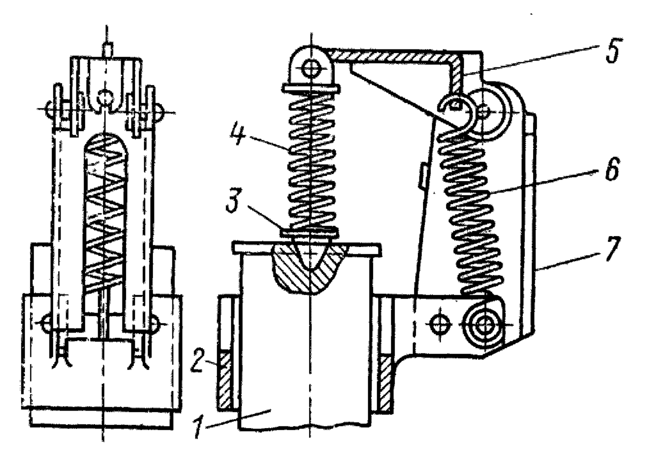


Рис. 9-63. Радиальный щеткодержатель.

1 — щетка; 2 — щеткодержатель; 3 — фарфоровый наконечник; 4 — пружина; 5 — рычаг; 6 — нажимная пружина; 7 — корпус щеткодержателя.

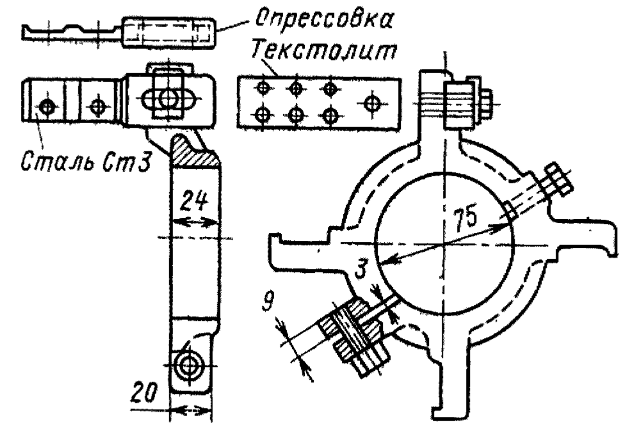


Рис. 9-64. Траверса.

В машинах постоянного тока щеточные пальцы крепят к траверсе, являющейся несущей конструкцией всего узла токосъема. Траверса должна иметь возможность перемещения по окружности в целях установки щеток на геометрическую нейтраль при сборке и наладке машины. На рис. 8.64 показана одна из возможных конструкций траверсы, которая применяется для машин относительно небольших мощностей. Траверсу закрепляют на специальной заточке подшипникового щита стяжными и стопорными болтами.

Пальцы, на которых укрепляют щеткодержатели, представляют собой цилиндрические или призматические стержни. Второе исполнение встречается чаще, так как оно проще в производстве и лучше фиксирует положение щеток. Призматические пальцы выполняют гетинакса или текстолита либо из полосы стали, спрессованной в месте крепления с траверсой. Цилиндрические пальцы изолируют от траверсы миканитовыми втулками и шайбами или спрессовывают пластмассой. Число пальцев в машине обычно равно числу полюсов. Щеточные пальцы одинаковой полярности соединяют между собой медными шинами или проводами.

Щеткодержатели асинхронных и синхронных машин располагаются на изолированной части пальца, металлический конец которого спрессован или ввинчен в прилив подшипникового щита.

Иногда у машин постоянного тока применяется также крепление щеточных пальцев непосредственно к подшипниковому щиту. Такое крепление принято, например, у машин серии 2П с высотой оси вращения $h = 355...500$ мм.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. Проектирование асинхронных машин

В асинхронных машинах преобразование энергии происходит при несинхронном (асинхронном) вращении ротора и магнитного поля статора [6].

9.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В двигательном режиме разница частот вращения ротора и поля статора в большинстве случаев невелика и составляет лишь несколько процентов. Поэтому частоту вращения ротора оценивают не в абсолютных единицах (об/мин или об/с), а в относительных, вводя понятие скольжения:

$$s = (n_c - n)/n_c,$$

где n_c — частота вращения поля (синхронная частота вращения); n - частота вращения ротора.

Скольжение выражается либо в относительных единицах (s = 0,02; 0,025 и т. п.), либо в процентах (s = 2 %; 2,5 % и т. п.).

Частота тока и ЭДС, наводимая в проводниках обмотки ротора, зависят от частоты тока и ЭДС обмотки статора и от скольжения:

$$f_2 = f_1 s; \quad E'_2 = E_1 s,$$

где E_1 — ЭДС обмотки статора; E'_2 — ЭДС обмотки ротора, приведенная к числу витков обмотки статора.

Теоретически асинхронная машина может работать в диапазоне изменения скольжения $s = -\infty...+\infty$ (рис. 9.1), но не при $s = 0$, так как в этом случае $n = n_c$ и проводники обмотки ротора неподвижны относительно поля статора, ЭДС и той в обмотке равны нулю и момент отсутствует. В зависимости от практически возможных скольжений различают несколько режимов работы асинхронных машин (рис. 9.1): генераторный режим при $s < 0$, двигательный при $0 < s < 1$, трансформаторный при $s = 1$ и тормозной при $s > 1$. В генераторном режиме ротор машины вращается в ту же сторону, что и поле статора, но с большей частотой.

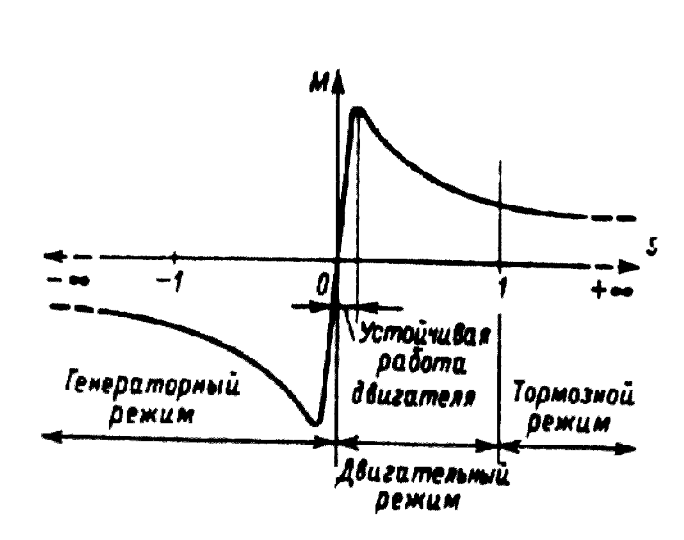


Рис. 9.1. Механическая характеристика асинхронной машины

В двигательном — направления вращения поля статора и ротора совпадают, но ротор вращается медленнее поля статора: $n = n_c(1 - s)$. В трансформаторном режиме ротор машины неподвижен и обмотки ротора и статора не перемещаются относительно друг друга. Асинхронная машина в таком режиме представляет собой трансформатор и отличается от него расположением первичной и вторичной обмоток (обмотки статора и ротора) и наличием воздушного зазора в магнитопроводе. В тормозном режиме ротор вращается, но направление его вращения противоположно направлению поля статора и машина создает момент, противоположный моменту, действующему на вал. Подавляющее большинство асинхронных машин используют в качестве двигателей, и лишь очень небольшое количество — в генераторном и трансформаторном режимах, в тормозном режиме — кратковременно.

Для оценки механической характеристики асинхронного двигателя моменты, развиваемые двигателем при различных скольжениях, обычно выражают не в абсолютных, а в относительных единицах, т. е. указывают кратность по отношению к номинальному моменту: $M^* = M/M_{ном}$. Зависимость $M^* = f(s)$ асинхронного двигателя (рис. 9.2) имеет несколько характерных точек, соответствующих пусковому $M^*_п$, минимальному M^*_{min}, максимальному M^*_{max} и номинальному $M^*_{ном}$ моментам.

Пусковой момент $M^*_п$ характеризует начальный момент, развиваемый двигателем непосредственно при включении его в сеть при неподвижном роторе ($s = 1$). После трогания двигателя с места его момент несколько уменьшается по сравнению с пусковым (см. рис. 9.2). Обычно M^*_{min} на 10... 15 % меньше $M^*_п$. Большинство двигателей проектируют так, чтобы их M_{min} был больше $M_{ном}$, так как они могут достигнуть номинальной скорости лишь при условии, что момент сопротивления, приложенный к валу, будет меньше, чем M_{min}.

Максимальный момент M^*_{max} характеризует перегрузочную способность двигателя. Если момент сопротивления превышает M^*_{max}, двигатель останавливается. Поэтому M^*_{max} называют также критическим, а скольжение, при котором момент достигает максимума, - критическим скольжением $s_{кр}$. Обычно $s_{кр}$ не превышает 0,1...0,15; в двигателях с повышенным скольжением (крановых, металлургических и т. п.) $s_{кр}$ может быть значительно большим.

В диапазоне $0 < s < s_{кр}$ характеристика $M=f(s)$ имеет устойчивый характер. Она является рабочей частью механической характеристики двигателя. При скольжениях $s > s_{кр}$ двигатель в нормальных условиях работать не может. Эта часть характеристики определяет пусковые свойства двигателя от момента пуска до выхода на рабочую часть характеристики.

Трансформаторный режим, т. е. режим, когда обмотка статора подключена к сети, а ротор неподвижен, называют также режимом короткого замыкания

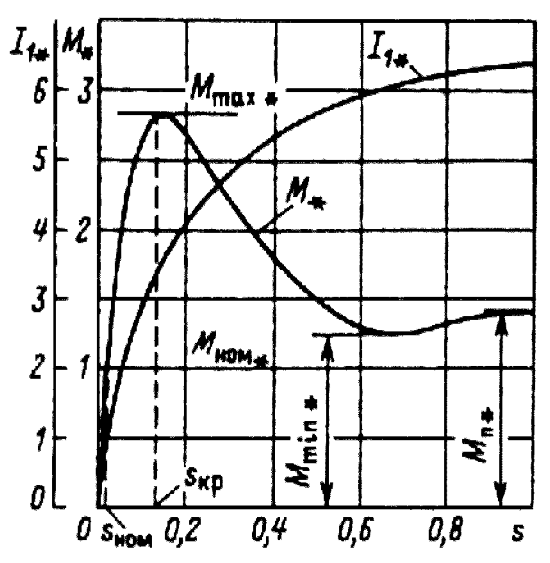


Рис. 9.2. Зависимость тока и момента асинхронного двигателя от скольжения

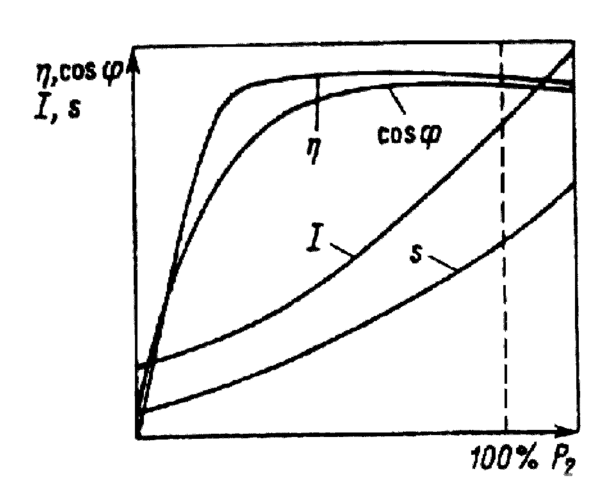


Рис. 9.3. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

двигателя. При $s = 1$ ток двигателя в несколько раз превышает номинальный, а охлаждение много хуже, чем при номинальном режиме. Поэтому в режиме короткого замыкания асинхронный двигатель, не рассчитанный для работы при скольжениях, близких к единице, может находиться лишь в течение нескольких секунд.

Режим короткого замыкания возникает при каждом пуске двигателя, однако в этом случае он кратковременен. Несколько пусков двигателя с короткозамкнутым ротором подряд или через короткие промежутки времени могут привести к превышению допустимой температуры его обмоток и к выходу двигателя из строя.

Для работы асинхронных машин со скольжениями, близкими к единице, в трансформаторном или тормозном режимах их рассчитывают с пониженными электромагнитными нагрузками. Примером использования асинхронных машин, номинальным режимом для которых является трансформаторный, могут служить индукционные регуляторы или фазовращатели [6].

Рабочие характеристики асинхронных двигателей (рис. 9.3) показывают, что наибольшего КПД правильно спроектированный двигатель достигает при нагрузке, на 15...20% меньше номинальной. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них из-за стандартной дискретной шкалы мощностей работают с недогрузкой. Напомним, что наибольший КПД будет у двигателя при нагрузке, при которой постоянные не зависящие от тока потери (потери в стали, механические, вентиляционные) будут в сумме равны переменным, зависящим от тока, — электрическим потерям в обмотках двигателя (см. гл. 6). Это позволяет

при проектировании направленным выбором плотности тока в обмотках и индукции на участках магнитопровода определить нагрузку, при которой КПД достигнет наибольшего значения.

Конструктивные исполнения асинхронных двигателей по способу монтажа соответствуют ГОСТ 2479. Наибольшее распространение получили группы исполнения IM2-IM4 (см. гл. 1), т.е. двигатели со станиной на лапах или с разного вида фланцами на станине или на подшипниковом щите. Среди двигателей малой мощности встречаются группы исполнения IM5 — машины без подшипниковых щитов и IM9 — машины специального исполнения, которые часто применяют как встроенные в различные механизмы, в ручной электрифицированный инструмент и т. п. Асинхронные двигатели мощностью более 1000 кВт, особенно с малой частотой вращения, часто выполняют с выносными подшипниковыми стойками — группа исполнения IM7 или IM8.

По степени защиты от воздействия окружающей среды наиболее характерны для двигателей малой и средней мощности исполнения IP44 и IP54 со способом охлаждения IC0141. Двигатели средней мощности выпускают также со степенью защиты IP23 и способом охлаждения IC01. Двигатели большой мощности на высокое напряжение часто имеют закрытое исполнение со встроенным воздушным или водяным охладителем, например с охлаждением по способу IC37A81 (см. гл. 7).

Сердечники статоров и роторов всех асинхронных двигателей общего назначения шихтуют из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. При длине сердечника менее 250...300 мм они выполняются без вентиляционных каналов. При большей длине сердечники подразделяют на пакеты длиной 40...50 мм каждый. Между пакетами устанавливают дистанционные распорки, при этом образуются радиальные вентиляционные каналы, служащие для прохода охлаждающего воздуха. Ширина каналов в большинстве машин выполняется равной 10 мм. В собранной машине радиальные каналы статора и ротора располагаются напротив друг друга.

Статоры машин общего назначения напряжением до 660 В, мощностью до 100 кВт имеют трапецеидальные полузакрытые пазы с узким шлицем (см. рис. 3.4), размерные соотношения которых (ширину верхней и нижней частей и высоту паза) выполняют такими, чтобы зубцы статора имели параллельные стенки. Это уменьшает МДС зубцов по сравнению с зубцами с неравномерной площадью поперечного сечения. Обмотку таких машин выполняют из круглого провода.

В статорах машин большей мощности обмотку выполняют из прямоугольного провода, причем при напряжении, не превышающем 660 В, из подразделенных катушек. Пазы статора в таких машинах полуоткрытые (см. рис. 3.6, а), что позволяет избежать большой неравномерности индукции в воздушном зазоре.

Обмотку укладывают в пазы, пропуская через суженный шлиц паза каждую из полукатушек поочередно (см. гл. 3).

В статорах машин с номинальным напряжением 3 кВ и выше и машин специального исполнения независимо от напряжения выполняют обмотку из жестких, изолированных до укладки в пазы катушек. Поэтому пазы таких машин делают только открытыми (см, рис. 3.6, б).

Конструкция крепления сердечника статора в корпусе зависит от габаритов и мощности машины. В большинстве машин малой мощности корпуса выполняют из алюминия, в некоторых конструкциях - заливкой алюминия на собранный сердечник статора. Подшипниковые щиты также алюминиевые. В машинах большей мощности и корпуса, и подшипниковые щиты чугунные. В машинах больших габаритов корпуса сварные из стальных листов, закрытые снаружи листовой сталью. Магнитопровод крепится к продольным ребрам корпуса.

Магнитопроводы роторов шихтуют из той же стали, что и статоров. В двигателях общего назначения с высотой оси вращения до 450 мм их насаживают непосредственно на вал, причем до высоты1 оси вращения 250 мм — на гладкий вал; в двигателях с большей высотой оси вращения — крепят на валу с помощью шпонки. Сердечники роторов больших габаритов насаживают на втулку или на остов ротора.

В большинстве асинхронных двигателей вентиляторы устанавливают на валу ротора, в двигателях со степенью защиты IP23 - внутри корпуса, со степенью защиты IP44 и IP54 — вне корпуса и защищают кожухом.

Асинхронные двигатели подразделяют на два типа: с короткозамкнутыми (рис. 9.4) и фазными (рис. 9.5) роторами. По конструкции они отличаются между собой только роторами и отдельными элементами корпусов. В пазах фазных роторов располагают изолированную трехфазную обмотку, жестко соединенную в звезду или в треугольник. Обмотка имеет три вывода, которые соединены токопроводами с контактными кольцами. Прилегающие к контактным кольцам щетки электрически соединяют выводы обмотки ротора с пусковым реостатом, который позволяет увеличивать сопротивление роторной цепи во время пуска двигателя. Контактные кольца располагают либо внутри корпуса, либо вне его на выступающем конце вала. При такой конструкции кольца и весь щеточный аппарат закрывают кожухом из листовой стали.

При пуске двигателя между кольцами включают пусковые резисторы, что увеличивает активное сопротивление цепи ротора и, следовательно, пусковой момент двигателя и ограничивает ток при пуске и разгоне. По мере разгона группы резисторов пускового реостата поочередно замыкают, причем время замыкания очередной группы выбирают таким, чтобы до

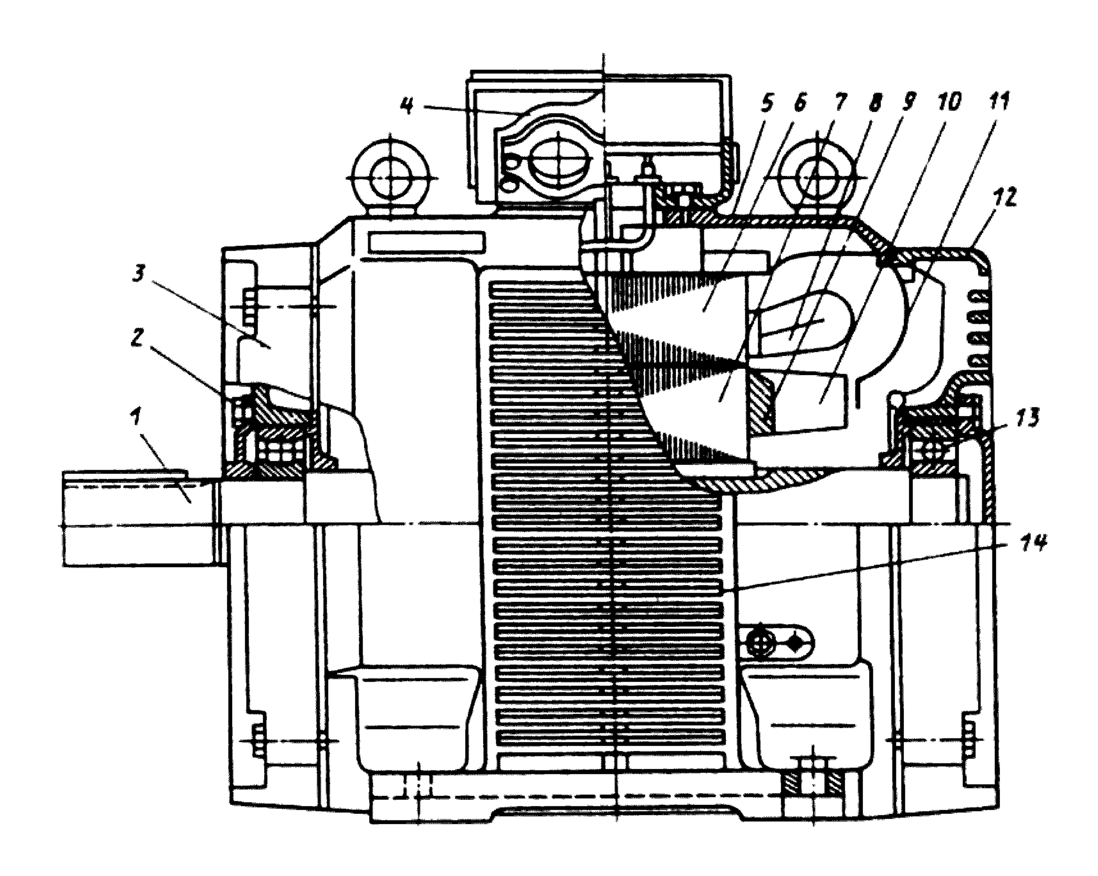


Рис. 9.4. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23, h = 225 мм:
1 — вал; 2, 13 — подшипники; 3, 12 — подшипниковые шиты; 4 — коробка выводов; 5 — корпус. 6 — сердечник статора; 7 — сердечник ротора; 8 — лобовые части обмотки статора; 9 — короткозамыкающие кольца обмотки ротора; 10 — вентиляционные лопатки ротора; 11 — диффузор; 14 — жалюзи корпуса

достижения номинальной частоты вращения во время всего пускового периода момент и ток двигателя изменялись в определенных пределах (рис. 9.6).
Включение резисторов в цепь ротора используют также для и плавного регулирования частоты вращения. Однако эта возможность ограничена возникновением больших потерь в резисторах, по которым проходит фазный ток ротора. В ряде приводов, например в крановых, такой способ регулирования все же применяют, но в этом случае используют не пусковой, а регулировочный реостат, рассчитанный на длительную работу при больших токах.

Обмотки короткозамкнутых роторов не имеют изоляции. В двигателях общего назначения мощностью до 300...400 кВт их выполняют заливкой пазов алюминием или его сплавами, причем одновременно со стержнями обмотки отливают замыкающие кольца с вентиляционными лопатками (см. рис. 3.10). В ряде конструкций двигателей этой мощности и во всех двигателях большей мощности обмотку роторов изготовляют из вставных стержней, в подавляющем большинстве случаев — медных. К выступающим из пазов концам стержней припаивают или приваривают замыкающие кольца.

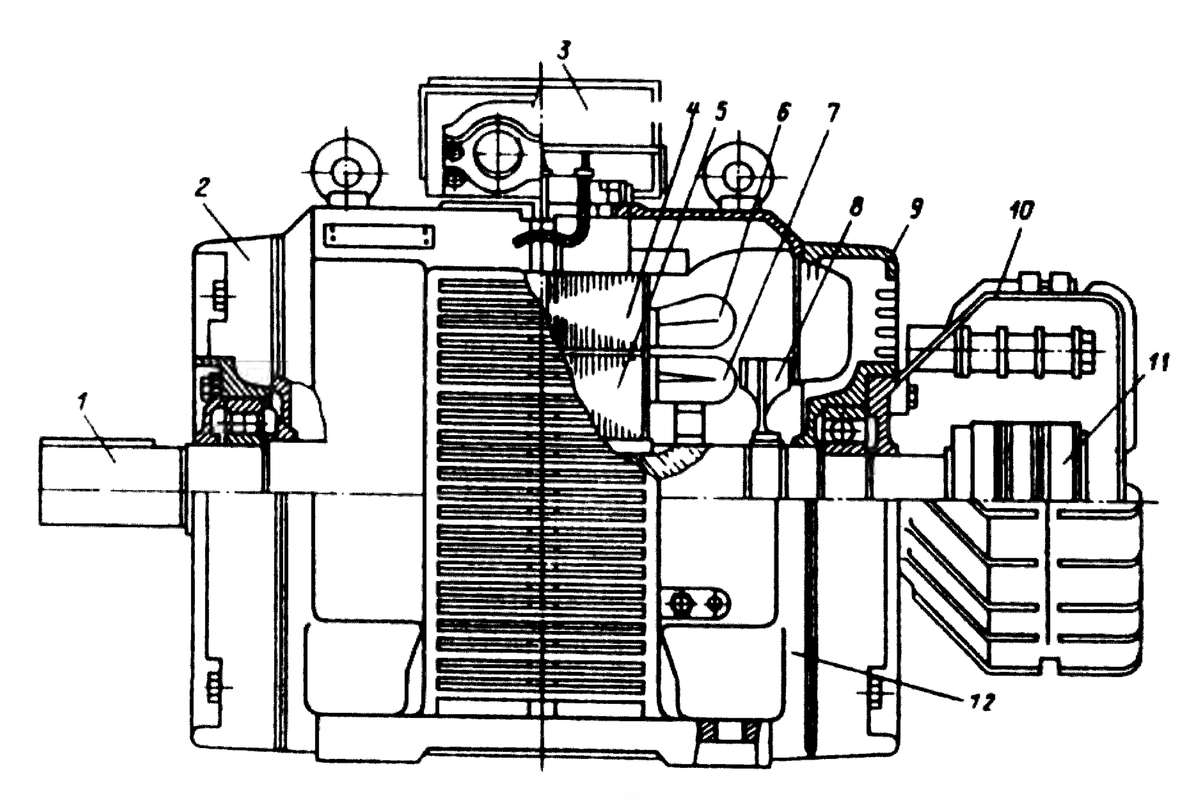


Рис. 9.5. Двигатель серии АИ с фазным ротором со степенью защиты IP23, A=225 мм:

1 — вал; 2,9 — подшипниковые щиты; 3 — коробка выводов; 4 — сердечник статора; 5 — сердечник ротора; 6 — лобовые части обмотки статора; 7 — лобовые части обмотки ротора; 8 — вентилятор; 10 — кожух контактных колец; 11 — контактные кольца; 12 — корпус

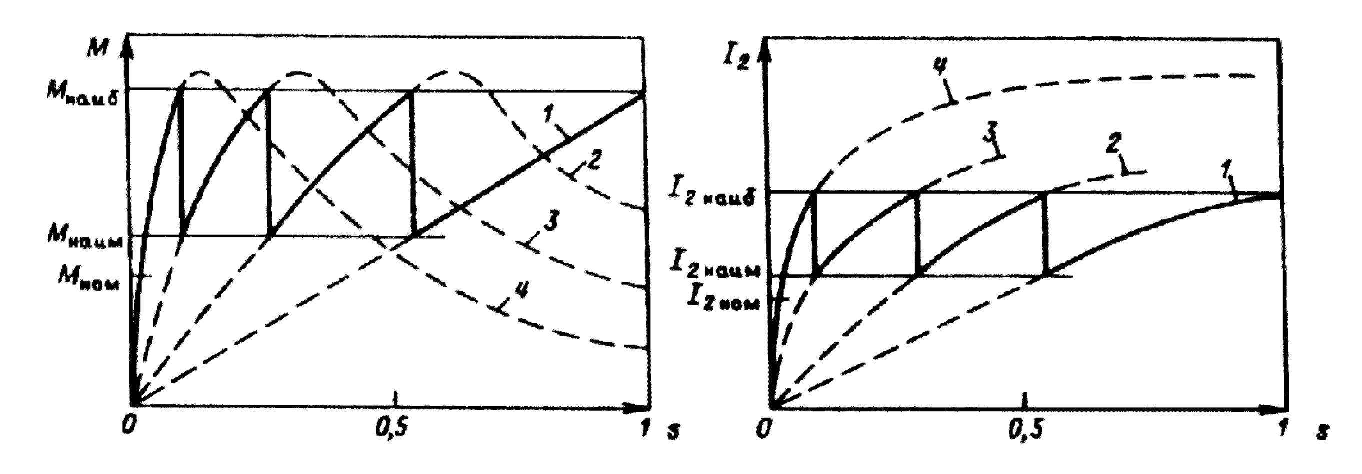


Рис. 9.6. Изменение тока и момента при реостатном пуске асинхронного двигателя с фазным ротором:

1—3 — характеристики при различных ступенях пускового реостата с последовательно убывающими значениями сопротивлений; 4 — естественные характеристики; $M_{наиб}$, $M_{наим}$ — наибольший и наименьший моменты, развиваемые двигателем в процессе реостатного пуска; $I_{2наиб}$, $I_{2наим}$ — наибольший и наименьший токи ротора во время разгона двигателя

Технология изготовления роторов с короткозамкнутой обмоткой значительно проще, чем фазных. Кроме того, в связи с отсутствием изоляции, контактных

колец, скользящих контактов и пусковых реостатов уменьшаются габариты и стоимость двигателей, повышается их надежность и упрощаются техническое обслуживание и эксплуатация. Поэтому большинство современных асинхронных двигателей выполняют с короткозамкнутыми роторами. Одним из недостатков асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами является невозможность включить в цепь ротора во время пуска реостат для увеличения пускового момента и снижения тока. При проектировании двигателей с короткозамкнутыми роторами направленным выбором параметров ограничивают пусковой ток до 6 – 7 кратного по сравнению с номинальным, а для повышения пусковых моментов используют эффект вытеснения тока в стержнях обмотки ротора. Он заключается в неравномерном распределении плотности тока по поперечному сечению стержня. Под действием эффекта вытеснения плотность тока в ближайшей к дну паза части каждого стержня уменьшается, а в верхней возрастает. Неравномерность распределения плотности тока вызывает увеличение электрических потерь в обмотке, эквивалентное увеличению ее активного сопротивления, и пусковой момент двигателя возрастает.

Действие эффекта вытеснения тока проявляется в большей степени при большей частоте тока, поэтому в двигательном режиме наибольшая неравномерность распределения плотности тока по сечению стержня наблюдается при $s = 1$, когда $f_2 = f_1$. При этом же скольжении будет и наибольшее эквивалентное сопротивление обмотки ротора, вызывающее увеличение пускового момента. При разгоне двигателя частота тока в роторе уменьшается ($f_2 = f_1 s$) и соответстственно уменьшается сопротивление обмотки. В режимах, близких к номинальному, частота тока в роторе мала, эффект вытеснения тока практически не проявляется и плотность тока одинакова по всему сечению стержней ротора.

Увеличение эквивалентного сопротивления под действием эффекта вытеснения тока проявляется в большей степени в стержнях, поперечное сечение которых имеет большую высоту или уменьшенную площадь верхней части по сравнению с нижней. Поэтому в роторах двигателей, предназначенных для работы с тяжелыми условиями пуска, делают глубокие прямоугольные пазы (глубокопазные роторы) или стержни обмотки выполняют фигурными. Обмотки роторов с фигурными пазами выполняют в большинстве двигателей заливкой алюминием или его сплавами. Это позволяет выполнять конфигурацию пазов с оптимальными размерными соотношениями стержней для достижения требуемого действия эффекта вытеснения тока.

Еще больший эффект увеличения сопротивления при пуске возникает в роторах с двойной беличьей клеткой, в пазах которой друг над другом располагают стержни двух обмоток. Верхние стержни образуют одну обмотку, нижние — другую. При пуске, когда эффект вытеснения тока проявляется в наибольшей степени, практически весь ток протекает по верхней клетке. Ее называют пусковой. При работе в номинальном режиме и с малыми скольжениями действие

эффекта вытеснения тока очень мало и ток распределяется равномерно по обеим обмоткам пропорционально их активному сопротивлению. Обмотку, образованную нижними стержнями, называют рабочей.

Обмотки роторов с двойной беличьей клеткой выполняют как литыми, так и из вставных стержней. В литых обмотках обе клетки — и рабочую, и пусковую — и замыкающие кольца одновременно заливают одинаковым металлом. В роторах со вставными стержнями рабочую обмотку выполняют из медных, а пусковую — обычно из латунных стержней. В таких роторах замыкающие кольца обмоток раздельные, из того же материала, что и стержни. Латунь применяют для пусковых клеток, так как она имеет большее удельное сопротивление, чем медь, и сопротивление обмотки ротора в пусковых режимах возрастает сильнее, чем при стержнях из одинакового материала. Кроме того, теплоемкость латуни выше, чем меди, поэтому нагрев латунных стержней за время пуска двигателя ниже, чем медных того же размера.

Двигатели с фигурными пазами или с двойной клеткой на роторе имеют более высокие пусковые характеристики, чем с грушевидными или полуовальными пазами, однако у них больше индуктивное сопротивление обмоток роторов. Это приводит к понижению максимальных моментов и ухудшению коэффициента мощности двигателей в номинальном режиме. Поэтому такие роторы выполняют лишь для двигателей, предназначенных для тяжелых условий пуска, для которых требования к пусковым характеристикам более важны, чем к другим энергетическим показателям [6].

9.2. ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ 4А

Асинхронные двигатели являются основными двигателями в электроприводах практически всех промышленных предприятий. В СССР выпуск асинхронных двигателей превышал 10 млн. штук в год. Наиболее распространены двигатели на номинальное напряжение до 660 В, суммарная установленная мощность которых составляет около 200 млн. кВт.

Двигатели серии 4А выпускались в 80-х г. XX в. в массовом количестве и в настоящее время эксплуатируются, практически, на всех промышленных предприятиях России. Серия охватывает диапазон мощностей от 0,6 до 400 кВт и построена на 17 стандартных высотах оси вращения от 50 до 355 мм (табл. 9.1 и 9.2). Серия включает основное исполнение двигателей, ряд модификаций и специализированные исполнения. Двигатели основного исполнения предназначены для нормальных условий работы и применяются двигателями общего назначения. Это трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, рассчитанные на частоту сети 50 Гц. Они имеют исполнение по степени

защиты IP44 во всем диапазоне высот оси вращения и IP23 в диапазоне высот осей вращения 160...355 мм.

Т а б л и ц а 9.1. Увязка мощности высоты исполнение по степени оси вращения двигателей серии 4А, защиты IP44

Высота оси вращения, мм	Условная длина сердечника, станины	Мощность, кВт, при числе полюсов 2р					
		2	4	6	8	10	12
50	A	0,09	0,06	—	—	—	—
	B	0,12	0,09	—	—	—	—
56	A	0,18	0,12	—	—	—	—
	B	0,25	0,18	—	—	—	—
63	A	0,37	0,25	0,18	—	—	—
	B	0,55	0,37	0,25	—	—	—
71	A	0,75	0,55	0,37	—	—	—
	B	1,1	0,75	0,55	0,25	—	—
80	A	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—
	B	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—
90	LA(B)	3	2,2	1,5	0,75;	—	—
					(1,1)	—	—
100	S	4	3	—	—	—	—
	L	5,5	4	2,2	1,5	—	—
112	MA(B)	7,5	5,5	3(4)	2(3)	—	—
132	S	—	7,5	5,5	4	—	—
	M	11	11	7,5	5,5	—	—
160	S	15	15	11	7,5	—	—
	M	18,5	18,5	15	11	—	
180	S	22	22	—	—	—	—
	M	30	30	18,5	15	—	—
200	M	37	37	22	18,5	—	—
	L	45	45	30	22	—	—
225	M	55	55	37	30	—	—
250	S	75	75	45	37	30	—
	M	90	90	55	45	37	—
280	S	110	ПО	75	55	37	—
	M	132	132	90	75	45	—
315	S	160	160	ПО	90	55	45
	M	200	200	132	ПО	75	55
355	S	250	250	160	132	90	75
	M	315	315	200	160	110	90

Таблица 9.2. Увязка мощности и высоты оси вращения двигателей серии 4А, исполнение по степени защиты IP23

Высота оси вращения, мм	Условная длина сердечника станины	Мощность, кВт, при числе полюсов 2р					
		2	4	6	8	10	12
160	S	22	18,5	—	—	—	—
	M	30	22	—	—	—	—
180	S	37	30	10,5	15	—	—
	M	45	37	22	18,5	—	—
200	M	55	45	30	22	—	—
	L	75	55	37	30	—	—
225	M	90	75	45	37	—	—
250	S	110	90	55	45	—	—
	M	132	110	75	55	—	—
280	S	160	132	90	75	45	—
	M	200	160	110	90	55	—
315	S	—	200	132	110	75	55
	M	250	250	160	132	90	75
355	S	315	315	200	160	110	90
	M	400	400	250	200	132	110

В серии принята следующая система условных обозначений двигателей:

$$\underset{1}{\underline{4A}}\;\underset{2}{\underline{X}}\;\underset{3}{\underline{X}}\;\underset{4}{\underline{X}}\;\underset{5}{\underline{X}}\;\underset{6}{\underline{X}}\;\underset{7}{\underline{X}}\;\underset{8}{\underline{X}}$$

Буквы и цифры в порядке следования их в условном обозначении означают следующее:

1 — название серии (4А);

2 — исполнение двигателей по степени защиты: буква Н — исполнение IP23, отсутствие буквы — исполнение IP44;

3 — исполнение по материалу станины и щитов: А — станина и щиты алюминиевые; Х — станина алюминиевая, щиты чугунные (или обратное сочетание материалов); отсутствие буквы — станина и щиты чугунные или стальные;

4 — высота оси вращения (две или три цифры), мм;

5 — установочный размер по длине станины: буквы S, M или L (меньший, средний или больший);

6 — длина сердечника: А — меньшая, В — бо́льшая при условии сохранения установочного размера; отсутствие буквы означает, что при данном установочном размере (S, M или L) выполняется только одна длина сердечника;

7 — число полюсов двигателя (одна или две цифры);

8 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150 (см. табл. 1.2).

Примеры обозначений двигателей серии 4А: 4А160М4УЗ — асинхронный двигатель серии 4А исполнения по степени защиты IP44, с короткозамкнутым ротором, с чугунными станиной и подшипниковыми щитами, с высотой оси вращения 160 мм, средним установочным размером по длине станины (М), четырехполюсный, климатического исполнения У, категории размещения 3.

4АНК28058УЗ — асинхронный двигатель серии 4А исполнения но степени защиты IP23, с фазным ротором, со стальной станиной и щитами высотой оси вращения 280 мм, с меньшим (S) установочным размером по длине станины, восьмиполюсный, климатического исполнения У, категории размещения 3.

Модификации и специализированные исполнения двигателей построены на базе основного исполнения и имеют те же принципиальные конструктивные решения основных элементов. Такие двигатели выпускаются отдельными отрезками серии на определенные высоты оси вращения и предназначены для применения в качестве приводов механизмов, предъявляющих специфические требования к двигателю или работающих в условиях, отличных от нормальных по температуре или чистоте окружающей среды, книжности и т. п.

К электрическим модификациям двигателей серии 4А относятся двигатели с повышенным номинальным скольжением, повышенным пусковым моментом, многоскоростные, частотой питания 60 Гц и т. п., к конструктивным модификациям — двигатели с фазным ротором, со встроенным электромагнитным тормозом, малошумные, со встроенной температурной защитой и т. п.

По условиям окружающей среды различают модификации двигателей тропического исполнения, влагоморозостойкого, химостойкого, сельскохозяйственного, пылезащищенные и др.

Специализированное исполнение имеют лифтовые двигатели, частотно-управляемые, высокоточные и др.

Двигатели различных модификаций и специализированного исполнения имеют те же обозначения, что и основного, но с добавочными буквами, проставляемыми либо после названия серии, либо после цифры, обозначающей число полюсов. Примеры обозначений модификаций и специализированных исполнений:

4АР... — двигатели с повышенным пусковым моментом;

4АС... — двигатели с повышенным номинальным скольжением;

4АК, 4АНК... — двигатели с фазным ротором, исполнения IP44 и IP23 соответственно;

4А...Е... — двигатели со встроенным электромагнитным тормозом;

4А...ОМ — двигатели для речных и морских судов гражданского флота.

Номинальное напряжение двигателей и число выводных концов обмотки статора в зависимости от высоты оси вращения приведены в табл. 9.3.

Таблица 9.3. Напряжения и число выводов

Мощность, кВт	Напряжение, В	Число выводных концов обмотки статоров
0,06—0,37	220 или 380	3
0,55—11	220, 380 или 660	3
15—110	220/380 и 380/660	6
132—400	380/660	6

Большинство двигателей серии 4А имеет степень защиты IP44 и выпущено в конструктивном исполнении, относящемся к группе IM1, т. е. с горизонтальным валом, на лапах, с двумя подшипниковыми щитами (рис. 9.7). Корпус двигателей выполнен с продольными радиальными ребрами, увеличивающими поверхность охлаждения и улучшающими отвод тепла от двигателя в окружающий воздух. На противоположном от рабочего конце вала укреплен вентилятор, прогоняющий охлаждающий воздух вдоль ребер корпуса. Вентилятор закрыт кожухом с отверстиями для прохода воздуха. В двигателях малой мощности вентилятор и кожух пластмассовые, в более мощных вентилятор литой из алюминиевого сплава, а кожух штампованный из тонкой листовой стали.

Магнитопровод двигателей — шихтованный из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, причем двигателей с h = 50...250 мм из стали марки 2013, а двигателей с h = 280...355 мм — из стали марки 2312.

Листы сердечника статора в двигателях малой мощности крепят после опрессовки проваркой по наружной поверхности в нескольких местах, а в двигателях большей мощности — стальными скобами, которые установлены по наружной поверхности сердечника.

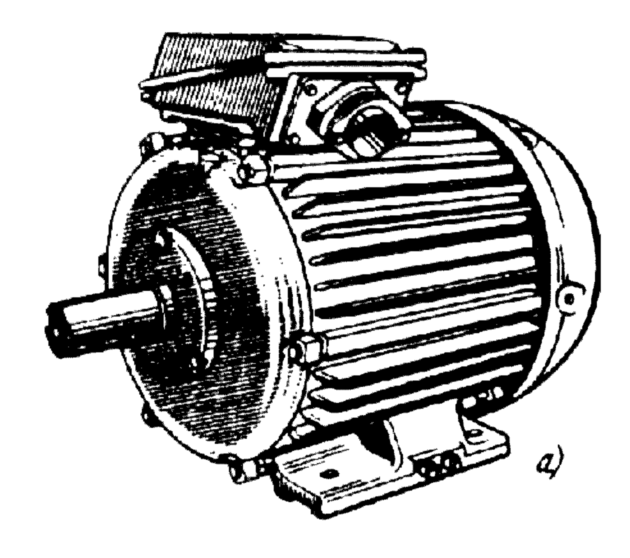
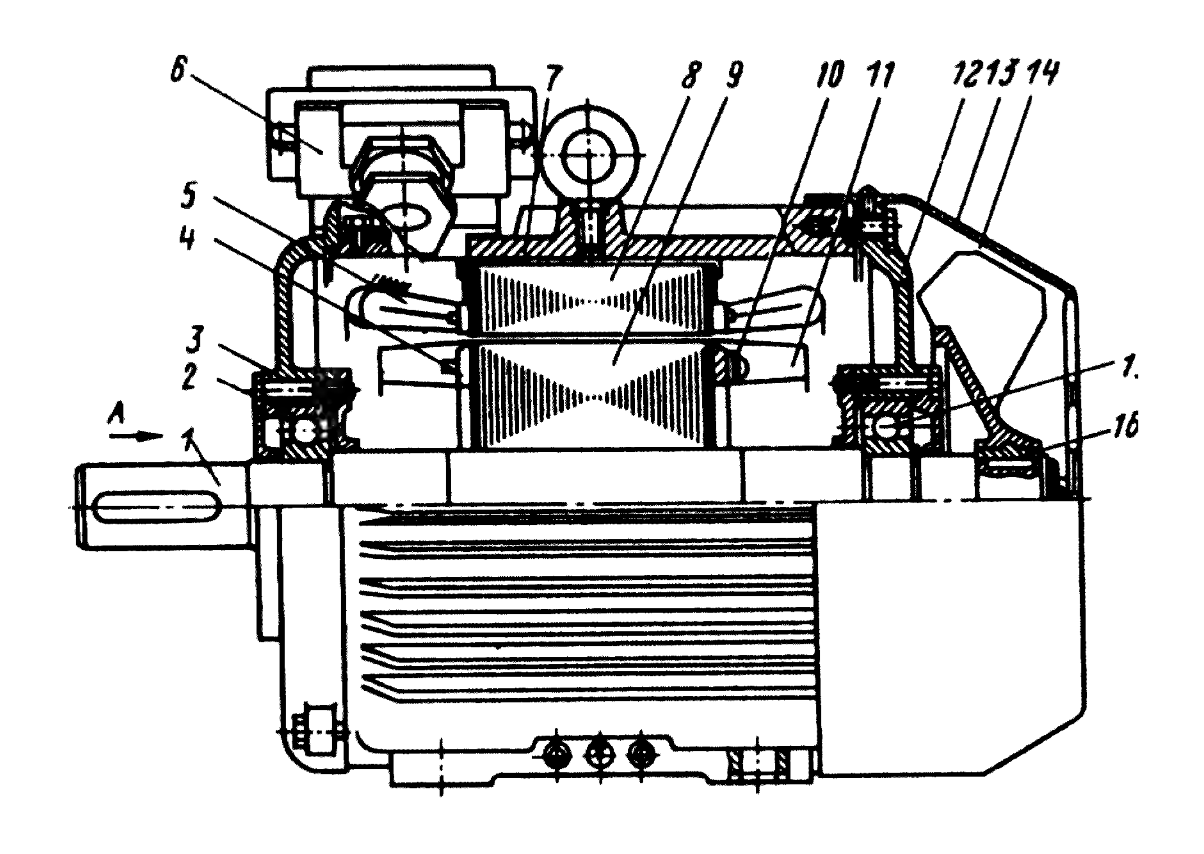
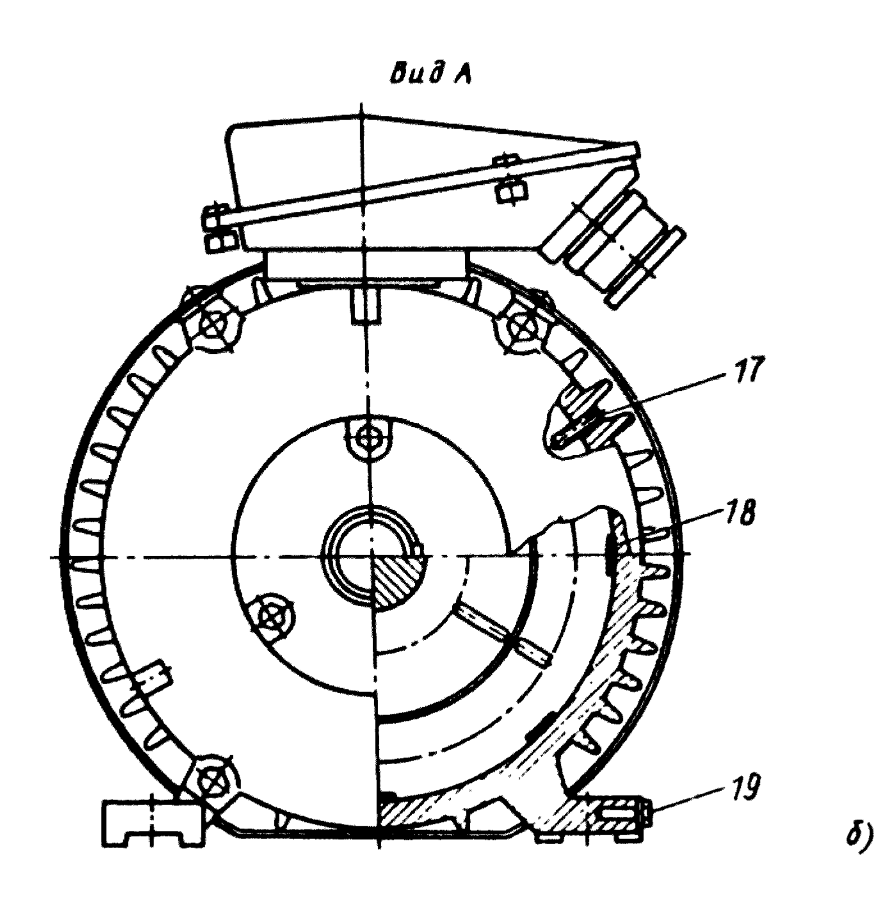


Рис. 9.7. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором со степенью защиты 1P44(54), h =160 мм, исполнение IM1001:

а — общий вид; б — продольный и поперечный разрезы; 1 — вал; 2, 15 — подшипники;
3, 12 — подшипниковые шиты; 4 — короткозамыкающие кольца ротора;
5 — лобовые части обмотки статора; 6 — коробка выводов; 7 — корпус;
8 — сердечник статора; 9 — сердечник ротора; 10 — балансировочные грузы;
11 — вентиляционные лопатки ротора; 13 — кожух вентилятора; 14 — вентилятор;
16 — втулки вентилятора; 17 — стопорные винты;
18 — скобы крепления сердечника статора; 19 — болты заземления


6
7
8
9
10
11
12
13
14
5
4
3
2
1
A
1.
16


Вид А
17
18
19
б)

Сердечник статора запрессован непосредственно в корпус.

Во всех двигателях серии с h < 280 мм и в двигателях с 2p = 10 и 12 всех высот оси вращения обмотка статора выполнены из круглого провода и пазы статора полузакрытые. При h = 280...355 мм, кроме двигателей с 2p = 10 и 12, катушки обмотки статора намотаны прямоугольным проводом, подразделенные и пазы статора полуоткрытые.

Сердечник ротора напрессован непосредственно на вал без промежуточной втулки, в двигателях с h ≤ 250 мм — на гладкий вал. В двигателях с большей высотой оси вращения он крепится на валу с помощью шпонки.

Обмотка короткозамкнутого ротора лопатки и кольца — литые из алюминия. Вентиляционные лопатки на кольцах ротора служат для перемешивания воздуха, находящегося внутри машины. Этим обеспечивается перенос тепла, выделяющегося в обмотке ротора и лобовой части обмотка статора, к внутренним поверхностям корпуса и подшипниковых щитов, которые охлаждаются наружным воздухом с помощью внешнего вентилятора.

Подшипниковые щиты крепят к корпусу с помощью четырех или шести болтов. Допуски на обработку поверхностей посадки щитов в станину обеспечивают необходимую точность центровки ротора относительно статора и, следовательно, точность размера воздушного зазора двигателя.

Коробка выводов расположена сверху станины, что облегчает монтажные работы при соединении двигателя с сетью.

В двигателях исполнения по степени защиты IP23 с высотой оси вращения 160...250 мм (рис. 9.8) корпус гладкий, без наружных ребер. Сердечник статора крепится на внутренние продольные ребра корпуса таким образом, что между наружной поверхностью сердечника и

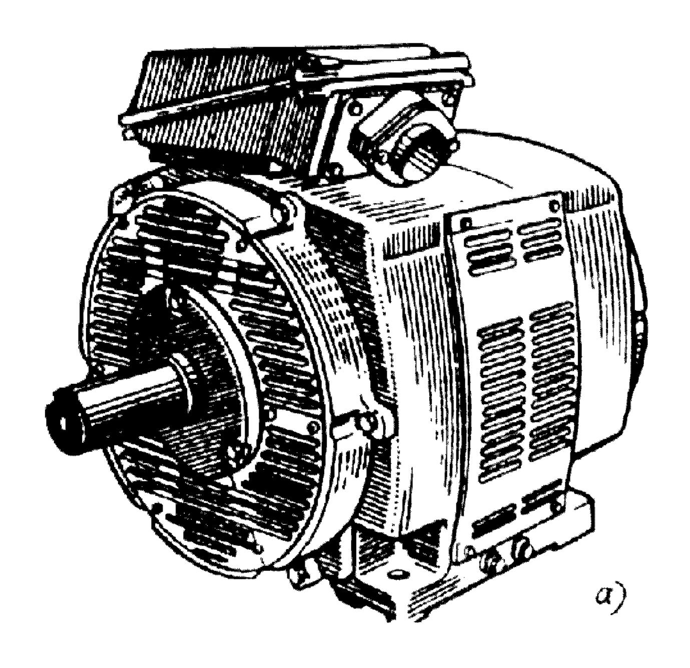


Рис. 9.8. Двигатель серии 4А с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23:

а — общий вид; б — продольный и поперечный разрезы; 1, 13 — подшипники; 2, 11 — диффузоры; 3. 8 — подшипниковые щиты; 4 — коробка выводов; 5 — стопорный винт; 6 — сердечник статора; 7 — корпус; 9 — лобовые части обмотки статора; 10 — короткозамыкающее кольцо обмотки ротора; 12 — вентиляционные лопатки; 14 — вал; 15 — скобы крепления сердечника статора; 16 — болт заземления; 17 — подшипниковая крышка

корпусом образуются каналы для прохода охлаждающего воздуха. Охлаждение двигателей — радиальное двустороннее. Охлаждающий воздух проходит внутрь корпуса через жалюзи в подшипниковых щитах и направляется диффузорами на вентиляционные лопатки, отлитые вместе с обмоткой и замыкающими кольцами статора. Вентиляционные лопатки отбрасывают воздух на лобовые части обмотки статора. Далее воздух омывает наружную поверхность сердечника статора и выбрасывается через жалюзи, расположенные по бокам в нижней части корпуса.

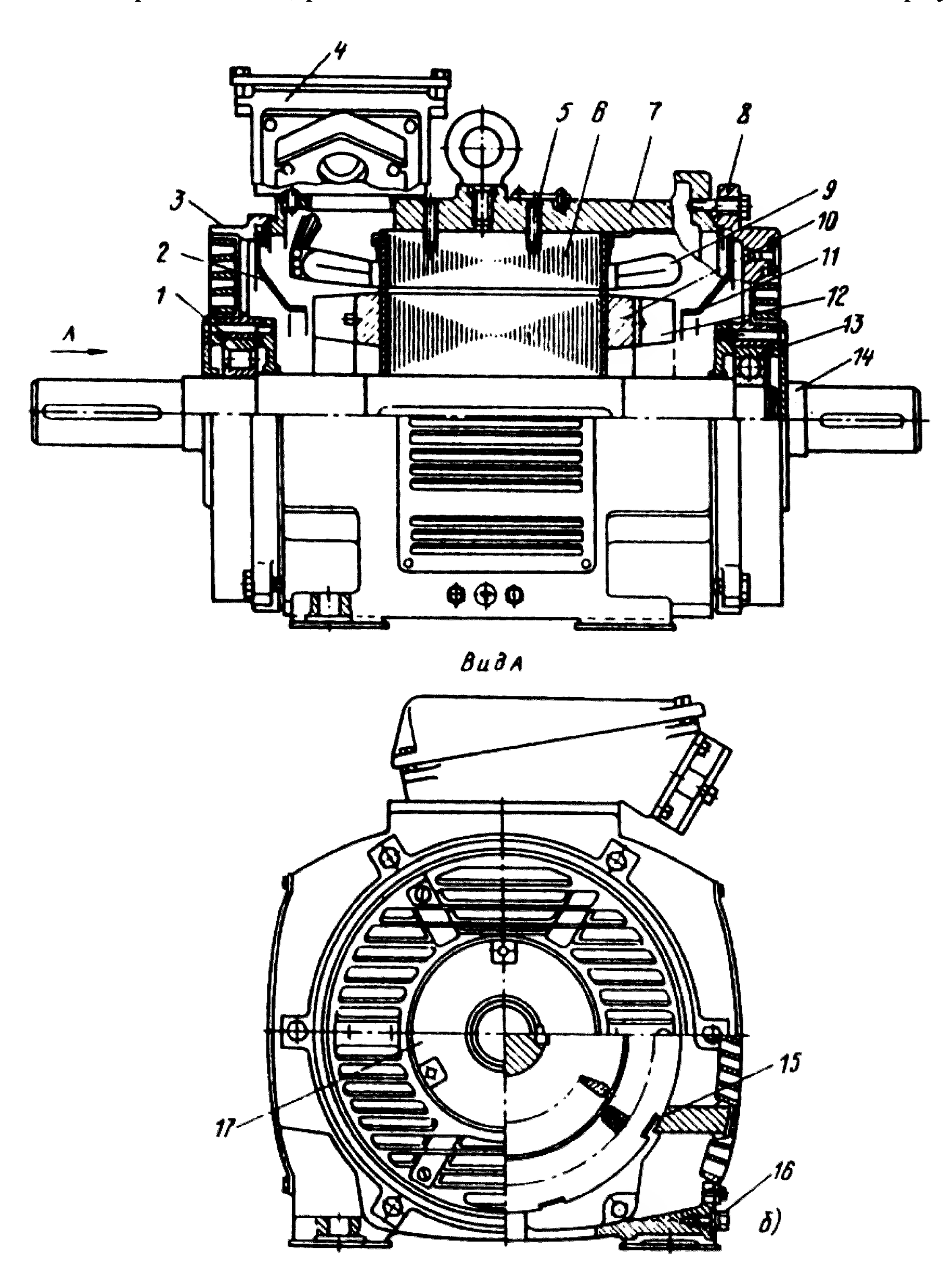


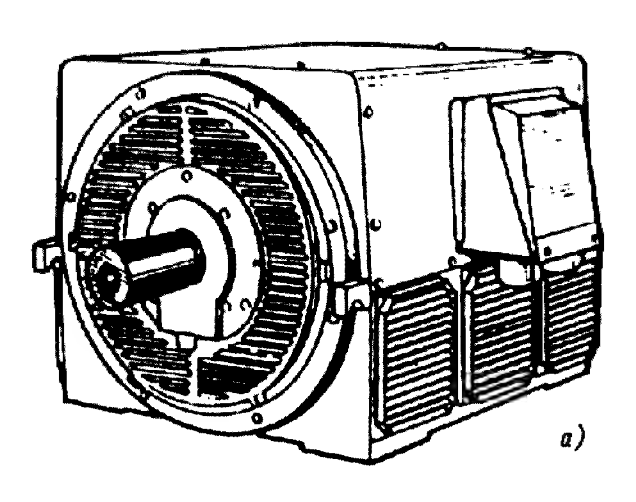
Рис. 9.9. Конструкция асинхронных двигателей серии 4А и АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP23, А=280...335 мм:

а — общий вид; б — продольный и поперечный разрезы; 1,9 — подшипники;

2. 7 — подшипниковые щиты; 3 — кожух двигателя; 4 — сердечник статора;

5 — сердечник ротора; 6 — лобовые части обмотки статора; 8 — торцевые жалюзи;

10 — вал; 11 — стойки корпуса; 12 — полустанина; 13 — коробка выводов



Вид А

б)

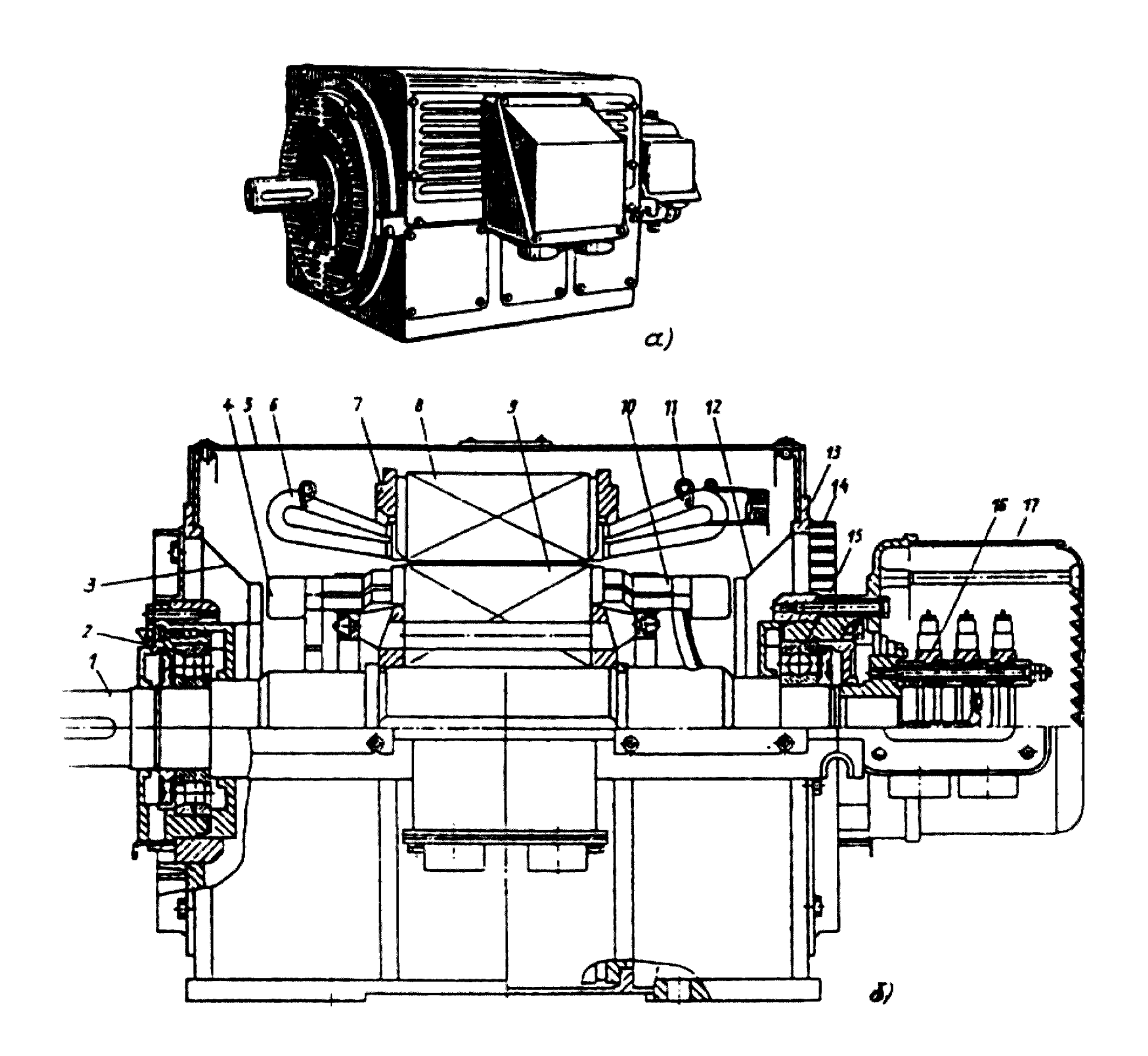


Рис. 9.10. Конструкция асинхронного двигателя с фазным ротором серии 4А со степенью защиты IP23, h = 280...355 мм:
а — общий вид; б — продольный разрез; 1 — вал; 2, 15 — подшипники; 3, 12 — диффузоры; 4 — вентиляционные лопатки; 5 — кожух; 6 — лобовые части обмотки статора; 7 — нажимные кольца статора; 8 — сердечник статора; 9 — сердечник ротора; 10 — лобовые части обмотки ротора; 11 — бандажное кольцо обмотки статора; 13 — подшипниковый щит; 14 — торцевые жалюзи; 16 — контактные кольца; 17 — кожух контактных колец

Двигатели исполнения по степени защиты IP23 с высотой оси вращения 280...355 мм имеют отличную от рассмотренных выше конструкцию корпуса (рис. 9.9). Сварная из стального проката станина (полустанина) охватывает только нижнюю половину сердечника статора. К ней же крепят подшипниковые щиты. Верхняя часть корпуса выполнена штампованной из листовой стали. Охлаждение двигателей — двустороннее радиальное. В связи с отказом от цельной станины существенно уменьшилась общая масса двигателя, а выполнение корпуса в виде параллелограмма вместо традиционной для электрических машин

цилиндрической формы позволило улучшить условия охлаждения двигателей без увеличения их габаритных размеров. В короткозамкнутых роторах двигателей с h $\geq$ 280 мм выполняют закрытые пазы, в двигателях с 2р $\geq$ 4 — трапецеидальные, сужающиеся к верхней части, при $2p = 2$ — лопаточные.

В фазных роторах (рис. 9.10), при прямоугольных, с малым раскрытием пазов, выполняют стержневую волновую обмотку. Выводные концы обмотки ротора проходят к контактным кольцам через внутреннее отверстие вала. Контактные кольца запрессовывают в пластмассу и крепят консольно к торцу вала. Весь щеточный узел закрыт кожухом из листовой стали.

В середине 80-х гг. XX в. некоторые типоразмеры двигателей серии 4А модернизированы в целях повышения их энергетических показателей и надежности. Были несколько изменены размерные соотношения магнитопровода и обмоточные данные. В обозначении модернизированных двигателей после названия серии проставляется буква М — двигатели серии 4АМ. Остальная индексация и цифры в условном обозначении остались прежними. Основные элементы конструкции двигателей серии 4АМ, их установочно-присоединительные размеры и шкала мощностей остались такими же, как в серии 4А [16].

9.3. ОСОБЕННОСТИ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ АИ и АИР

Серия асинхронных двигателей АИ разработана в 80-х гг. XX в. В ее разработке принимали участие многие страны-члены СЭВ, входящие в организацию «Интерэлектро», что отражено в названии серии АИ Асинхронные Интерэлектро. Для того чтобы двигатели были конкурентоспособны за рубежом, их качество и энергетические показатели должны находиться на уровне лучших зарубежных образцов. Кроме того, двигатели, выпускаемые в разных странах и разными фирмами, должны быть взаимозаменяемыми. Это возможно лишь в том случае, если ряды мощностей и установочно-присоединительных размеров серии, а также взаимная увязка их размеров и мощности будут одинаковы.

Благодаря тщательной подготовке производства и длительной конструкторско-технологической разработке, проводившейся в рамках «Интерэлектро», двигатели серии АИ по качеству и энергетическим показателям находятся на уровне лучших серийных двигателей, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами, а по массогабаритным показателям во многих типоразмерах превосходят их. При разработке серии приняты общие для двигателей большинства зарубежных стран шкалы мощностей и высот оси вращения, рекомендованные Международной электротехнической комиссией (МЭК). Вопрос об унификации взаимной увязки мощности двигателей и их установочно-присоединительных размеров (высоты оси вращения) остался окончательно не решенным. В настоящее время в мире существуют три системы увязки: принятая стандартом США (стандарт NEMA), принятая в стандартах большинства западноевропейских стран (CENELEC) и увязка, согласованная странами — участницами «Интерэлектро» (документ РС-

3031) и отраженная в национальных стандартах других стран. В серии АИ принята увязка мощностей с высотой оси вращения, рекомендованная этим документом, однако для поставок на экспорт двигатели выпускают с увязкой, соответствующей стандартам CENELEC. В связи с этим двигатели серии АИ имеют разное обозначение: двигатели для внутрироссийских поставок (увязка соответствующая РС-3031) обозначаются АИР, а двигатели, посылаемые на экспорт (увязка, соответствующая CENELEC), — АИС (табл. 9.4 и 9.5).

Т а б л и ц а 9.4. Увязка мощности и высоты оси вращения двигателей серии АИ, исполнение по степени защиты IP54

Высота оси вращения, мм	Условная длина сердечника	Номинальная мощность, кВт, при числе полюсов 2р									
		Вариант Р						Вариант С			
		2	4	6	8	10	12	2	4	6	8
45	A	0,04	0,025	—	—	—	—	—	—	—	—
	B	0,06	0,04	—	—	—	—	—	—	—	—
50	A	0,09	0,06	—	—	—	—	—	—	—	—
	B	0,12	0,09	—	—	—	—	—	—	—	—
56	A	0,18	0,12	—	—	—	—	0,09	0,06	—	—
	B	0,25	0,18	—	—	—	—	0,12	0,09	—	—
63	A	0,37	0,25	0,18	—	—	—	0,18	0,12	0,06	—
	B	0,55	0,37	0,25	—	—	—	0,25	0,18	0,09	—
71	A	0,75	0,55	0,37	—	—	—	0,37	0,25	0,18	0,09
	B	1,1	0,75	0,55	0,25	—	—	0,55	0,37	0,25	0,12
80	A	1,5	1,1	0,75	0,37	—	—	0,75	0,55	0,37	0,18
	B	2,2	1,5	1,1	0,55	—	—	1,1	0,75	0,55	0,25
90	S	—	—	—	—	—	—	1,5	1,1	0,75	0,37
	L	3,0	2,2	1,5	0,75 1,1	—	—	2,2	1,5	1,1	0,55
100	S	4	3	—	—	—	—	—	—	—	—
	L	5,5	4	2,2	1,5	— —	— —	3	2,2; 3	1,5	
112	M	7,5	5,5	3;4	2,2; 3	—	—	4	4	2,2	1,5
132	S	—	7,5	5,5	4	— —	— —	5,5 7,5	5,5	3	2,2
160	M	11	11	7,5	5,5	—	—	—	7,5	4; 5,5	3
	S	15	15	11	7,5	—	—	—	—	—	—
	M	18,5	18,5	15	11			11 15	11	7,5	4; 5,5

Продолжение табл. 9.4

Высота оси вращения, мм	Условная длина сердечника	Номинальная мощность, кВт, при числе полюсов 2p									
		Вариант Р						Вариант С			
		2	4	6	8	10	12	2	4	6	8
180	L	—	—	—	—	—	—	18,5	15	11	7,5
	S	22	22	—	—	—	—	—	—	—	—
	M	30	30	18,5	15			22	18,5		
	L	—	—	—	—				22	15	11
200	M	37	37	22	18,5	—	—	—	—	—	15
	L	45	45	30	22			30	30	18,5	
								37		22	
225	S	—	—	—	—	—	—	—	37	—	18,5
	M	55	55	37	30	—	—	45	45	30	22
250	S	75	75	45	37	22	—	—	—	—	—
	M	90	90	55	45	30	—	55	55	37	30
280	S	110	110	75	55	37	—	75	75	45	37
	M	132	132	90	75	45	—	90	90	55	45
315	S	160	160	110	90	55	45	110	110	75	55
	M	200	200	132	110	75	55	132	132	90	75
355	S	250	250	160	132	90	74	—	—	—	—
	M	315	315	200	160	110	90	—	—	—	—

Таблица 9.5. Увязка мощности и высоты оси вращения двигателей серии АИ, исполнение по степени защиты IP23

Высота оси враще-ния, мм	Условная длина сердеч-ника	Номинальная мощность, кВт, при числе полюсов 2p									
		Вариант Р						Вариант С			
		2	4	6	8	10	12	2	4	6	8
200	M	55	45	30	22	—	—	45	37	22	18,5
	L	75	55	37	30	—	—	55	45	30	22
225	M	90	74	45	37	—	—	75	55	37	30
250	S	110	90	55	45	—	—	90	75	45	37
	M	132	110	75	55	—	—	110	90	55	45
280	S	160	132	90	75	—	—	—	110	75	55
	M	200	160	110	90	—	—	132	132	90	75
315	S	—	200	132	110	75	55	160	160	110	90
	M	250	250	160	132	90	75	200	200	132	110
355	S	315	325	200	160	110	90	250	250	160	132
	M	400	250	250	200	132	110	315	315	200	160

Анализ данных табл. 9.4 и 9.5 показывает, что двигатели АИР почти по всей шкале мощностей выпускаются с высотой оси вращения, на одну ступень меньшей, чем двигатели АИС. Размеры активной части двигателей, изготовленных по варианту Р или С (двигатели АИР и АИС), в большинстве

типоразмеров одинаковы. Увеличение высоты оси вращения в двигателях АИС исполнения IM1001 достигается за счет увеличения высоты лап.

Двигатели серии АИР предназначены для привода вновь вводимою оборудования и замены двигателей серии 4А и модернизированной серии 4АМ на установленном оборудовании.

По варианту Р двигатели мощностью от 0,025 до 0,37 кВт выпускают на номинальное напряжение 220 и 380 В, мощностью от 0,55 но 11 кВ — на напряжение 220, 380 или 660 В. Во всех этих двигателях обмотка статора соединена в звезду или в треугольник внутри корпуса и имеет три выводных конца, подведенных к коробке выводов. Двигатели мощностью более 11 кВт изготовляют с шестью выводными концами обмотки статора, причем при мощности 15…110 кВт — на напряжение 220/380 В и при мощности 132 кВт и более — на напряжение 380/660 В. По заказу потребителей все двигатели серии могут быть изготовлены с шестью выводными концами обмотки статора и на другие напряжения.

Отдельные отрезки серии выпускают в следующих конструктивных исполнениях по способу монтажа (по ГОСТ):

Высота оси вращения h, мм	Исполнение по способу монтажа
200—350	IM1001
45 —250	IM1081; IM2081
280—355	IM1001, IM2001
45 —112	IM2181
45 —180	IM3001,IM3011,IM3031
200—280	IM3011.IM3031
45 —112	IM3601,IM3611,IM3631
45 —250	IM5010

Структура обозначений двигателей серии АИ аналогична принятой для серии 4А, однако имеет некоторое отличие в индексации.

Различают обозначения базовое, основное и полное. В базовом обозначении буквами и цифрами указывают название серии, вариант привязки мощности к высоте оси вращения, высота оси вращения, установочный размер по длине станины и магнитопровода и число полюсов. Основное обозначение содержит, кроме того, указания вида защиты и охлаждения двигателя, той или иной его модификации и вида исполнения по условиям окружающей среды. В полном обозначении эти сведения дополняются электрическими и конструктивными характеристиками данного двигателя, например указанием номинального напряжения, конструктивного исполнения по способу монтажа, исполнения конца вала, выводного устройства и т. п.

Приведем расшифровку основного обозначения двигателей:

$$\underset{1}{\underline{\text{АИ}}}\ \underset{2}{\underline{X}}\ \underset{3}{\underline{X}}\ \underset{4}{\underline{X}}\ \underset{5}{\underline{X}}\ \underset{6}{\underline{X}}\ \underset{7}{\underline{X}}\ \underset{8}{\underline{X}}$$

Буквы и цифры в порядке следования их в условном обозначении обозначают следующее:

1 — название серии;

2 — вариант увязки мощности с высотой оси вращения (Р или С);

3 — буквы, обозначающие исполнение по степени защиты от влияния окружающей среды, вид охлаждения, ту или иную электрическую модификацию;

4 — высота оси вращения, мм;

5 — буквы, указывающие установочный размер по длине станины и сердечника, соответственно S, M, L и A, B, C;

6 — число полюсов двигателя;

7 — буквы, обозначающие конструктивную модификацию;

8 — исполнение по условиям окружающей среды и категория размещения.

Для двигателей основного исполнения — на частоту питания 50 Гц, закрытых, с внешним обдувом (IP54), с короткозамкнутым ротором, предназначенных для эксплуатации в нормальных условиях в продолжительном режиме, —- буквы в позициях 3 и 7 не проставляются.

Значения остальных символов обозначения приведены ниже:

Вид исполнения, модификация	Условное обозначение, буквы	
	русские	латинские
Исполнение по виду защиты и охлаждения		
Закрытое с внешним обдувом корпуса со встроенным вентилятором	Не указывается	
Закрытое с естественным охлаждением	Б	B
Защищенное	Н	N
Открытое	Л	L
Закрытое продуваемое	П	P
С пристроенным вентилятором от отдельного двигателя (принудительное охлаждение)	Ф	F
Электрические модификации		
С повышенным скольжением	С	C
С повышенным пусковым моментом	Р	R
С регулируемой частотой вращения	Х	X
С фазным ротором	К	K
Для кратковременного режима работы	Кр	K_R
Конструктивные модификации		
С температурной защитой	Б	B
Малошумные	Н	N
С повышенной точностью установочных размеров	П	P
С высокой точностью установочных размеров	П2	P2
Со встроенным электромагнитным тормозом	Е	E
Встраиваемые	В	V

Примеры обозначения двигателей:

АИСН200М4Т2 — асинхронный двигатель серии АИ, увязка мощности по варианту С, Н — защищенного исполнения (IP23), высота оси вращения 200 мм, М — вторая длина корпуса по установочным размерам, четырехполюсный, Т2 — тропического исполнения;

АИРБР9084НПУ3 — асинхронный двигатель серии АИ, увязка мощности по варианту Р (для внутрироссийских поставок), Б — закрытое исполнение с естественной вентиляцией без обдува, Р — с повышенным пусковым моментом, высота оси 90 мм, S — первая типа корпуса по установочным размерам, четырехполюсный, Н — малошумный, П — с повышенной точностью установочных размеров, У3 — для умеренного климата, категория размещения 3.

Закрытые обдуваемые двигатели серии имеют исполнение по степени защиты от окружающей среды IP54, которое предусматривает, что двигатели защищены от попадания пыли внутрь корпуса в количестве, достаточном для нарушения его работы (цифра 5), и вода, разбрызгиваемая на оболочку двигателя с любой стороны, не оказывает вредного влияния на его работу (цифра 4). Общей конструктивной схемой двигателей исполнения по степени защиты IP54 является оребренный корпус (станина) с обдувом от наружного вентилятора, установленного на противоположном от рабочего конце вала, и сердечник ротора, непосредственно насаженный на вал, с обмоткой, выполненной заливкой пазов алюминием.

Магнитопроводы двигателей выполнены из холоднокатаной электротехнической стали толщиной 0,5 мм, причем двигатели с h = 45...63 мм — из стали марки 2013, с h = 71...160 мм — марки 2214, с h = 160...250 мм — марки 2212 или 2214 и с h = 280...355 мм — из стали марки 2312 или 2412.

Отдельные элементы конструкции двигателей несколько различаются в зависимости от высоты оси вращения.

Двигатели с h = 45...112 мм (рис. 9.11) имеют литые из высокопрочного алюминиевого сплава корпуса с горизонтально-вертикальным оребрением. Такая конструкция позволяет использовать для отливки четырехразъемные пресс-формы, что существенно упрощает технологию их изготовления. Корпуса отливают с лапами

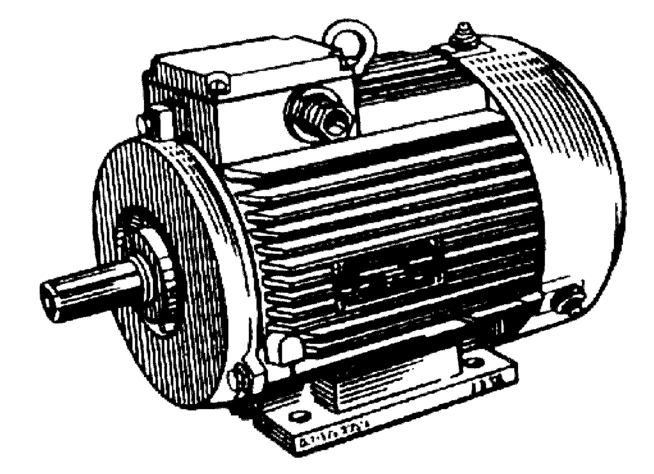


Рис. 9.11. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP54, h = 100 мм

для крепления к фундаментной плите и основанием коробки выводов. Подшипниковые щиты двигателей с высотой оси вращения до 63 мм также выполняют из алюминия. Они имеют наружные ребра для улучшения охлаждения. Сердечники статоров после опрессовки скрепляют несколькими швами сварки по наружной поверхности по длине сердечника. Наружные вентиляторы выполняют из высокопрочной и термостойкой пластмассы и защищают кожухом из того же материала.

Корпуса двигателей с h = 132... 180 мм мало отличаются от корпусов соответствующих двигателей серии 4А (см. рис. 9.7). Они выполняются либо из сплава алюминия с вертикально-горизонтальным оребрением, либо из чугуна с радиальным оребрением. По мере совершенствования технологии литья чугунные корпуса двигателей выполняются также с горизонтально-вертикальным оребрением, при этом массу чугунных отливок удается снизить на 15...25 %. Подшипниковые щиты — чугунные без охлаждающих ребер. Вентиляторы из пластмассы выполняют только для двигателей с h = 132 мм. У двигателей с большей высотой оси вращения вентиляторы отливают из алюминиевого сплава на чугунную втулку для посадки на вал. Кожухи вентиляторов — штампованные из листовой стали. Сердечники статоров у всех двигателей с h $\geq$ 132 мм скреплены скобами, которые приваривают в нескольких местах к наружной поверхности сердечника.

Двигатели с h = 200...250 мм (рис. 9.12) выпускают с чугунными литыми корпусами и подшипниковыми щитами. Оребрение корпусов радиальное. Подшипниковые щиты имеют внутренние ребра, к которым крепят диффузоры, создающие направленный поток воздуха, заключенного в корпусе двигателя.

Корпуса двигателей с высотой оси вращения h = 280...355 мм по своей конструкции резко отличаются от рассмотренных выше (рис. 9.13). Их выполняют из гофрированной рулонной стали толщиной 2...2,5 мм, что уменьшает их массу по сравнению с литыми из чугуна примерно в 2,8 раза. Подшипниковые щиты в двигателях чугунные. Лапы для крепления к фундаменту прикреплены к корпусу сваркой либо болтами.

Обмотка статора всех двигателей с h = 45...250 мм и двигателей с $2p = 10$ и 12,с h = 280...355 мм выполнена из круглого обмоточного провода (см. гл. 3). В двигателях меньших мощностей с h = 45... 132 мм обмотка однослойная концентрическая, в ряде типоразмеров выполнена вразвалку; в двигателях с h = 160... 250 мм — одно-двухслойная, а в многополюсных двигателях с h - 280...355 мм — двухслойная концентрическая. Таким образом, конструкция и схемы обмоток из круглого провода всех двигателей серии позволяют применять механизированные способы ее намотки.

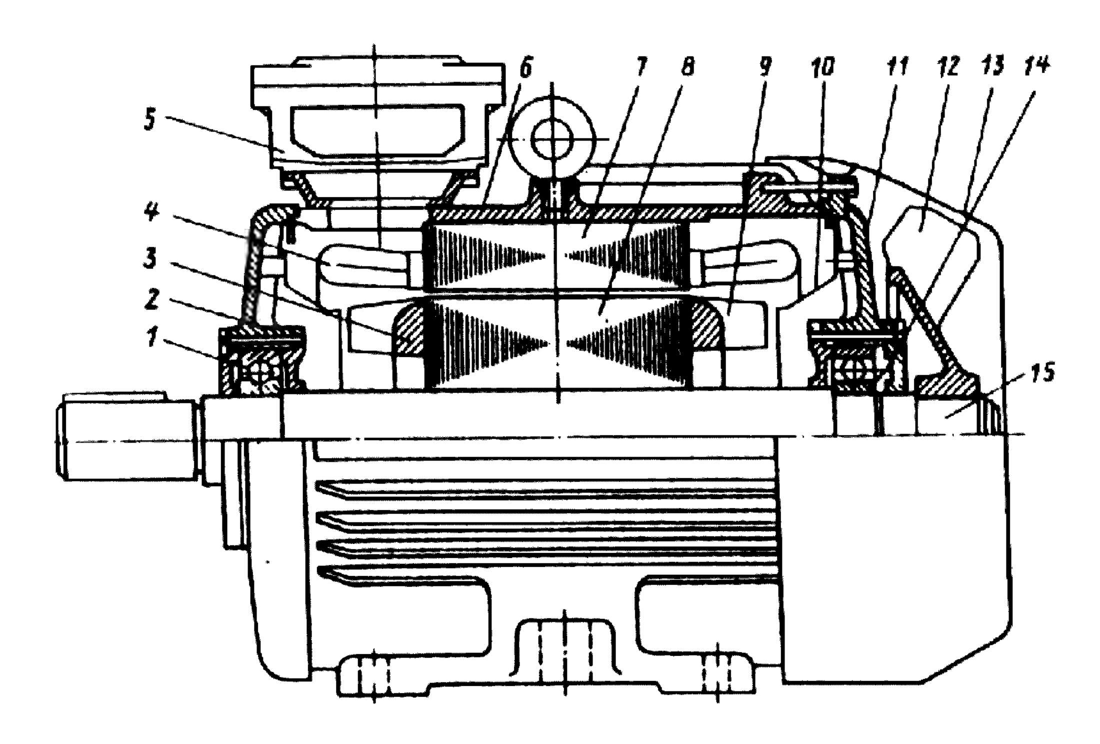


Рис. 9.12. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP54, h = 225 мм:

1, 14 — подшипники; 2. 11 — подшипниковые щиты; 3 — короткозамыкаюшее кольцо ротора; 4 — лобовые части обмотки статора; 5 — коробка выводов; 6 — корпус; 7 — сердечник статора; 8 — сердечник ротора; 9 — вентиляционные лопатки ротора; 10 — диффузоры; 12 — вентилятор; 13 — кожух вентилятора; 15 — вал

Обмотка статора двигателей с h = 280...355 мм (кроме 10- и 12-полюсных) выполнена из прямоугольного обмоточного провода, двухслойная из подразделенных катушек, что позволяет укладывать их в полуоткрытые пазы статора. Лобовые части обмотки укреплены бандажными кольцами. С помощью дистанционных прокладок между лобовыми частями катушек обмотки создаются промежутки для прохода охлаждающего воздуха.

Обмотки двигателей всех высот оси вращения выполнены проводом марки ПЭТМ-155 или ПЭТД-180. Для пазовой и межфазовой изоляций применяют материалы на основе фенелона, имеющие класс нагревостойкости F. Так как расчетный нагрев обмоток соответстствует классу нагревостойкости B, то при таком решении повысилась надежность обмотки.

Обмотки короткозамкнутых роторов выполнены заливкой сплавом алюминия. Одновременно отливают и замыкающие кольца с вентиляционными лопатками. Для крепления балансировочных грузов в замыкающих кольцах роторов двигателей с h ≤ 200 мм предусмотрены кольцевые канавки, а в двигателях с большей высотой оси вращения — штыри между вентиляционными лопатками.

Все двигатели исполнения по степени защиты IP54 охлаждаются с помощью наружного вентилятора, прогоняющего окружающий двигатель воздух вдоль ребер корпуса. Перенос тепла от обмотки статора и лобовых

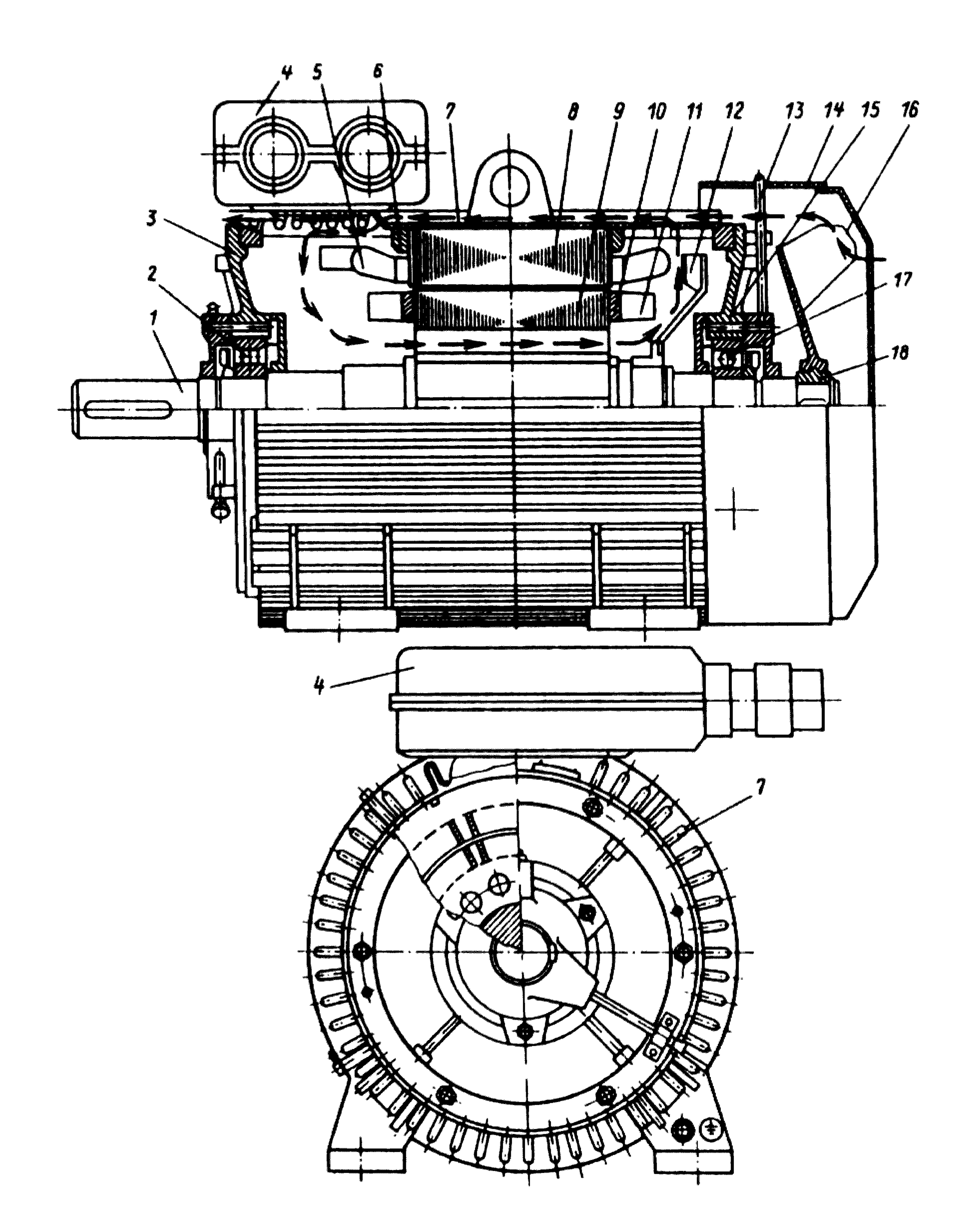


Рис. 9.13. Двигатель серии АИ с короткозамкнутым ротором со степенью защиты IP54, h = 280 мм, с гофрированной станиной:

1 — вал; 2, 17 — подшипники; 3. 15 — подшипниковые щиты; 4 — коробка выводов; 5 — лобовые части обмотки статора; 6 — нажимное кольцо статора; 7 — гофрированная станина; 8 — сердечник статора; 9 — сердечник ротора; 10 — короткозамыкающие кольца; 11 — вентиляционные лопатки; 12 — внутренний вентилятор; 13 — масленка для смазки подшипника; 14 — кожух вентилятора; 16 — наружный вентилятор; 18 — втулка вентилятора (стрелками показаны направления потоков охлаждающего воздуха)

частей обмотки статора к внутренней поверхности и корпуса и подшипниковых щитов происходит за счет циркуляции воздуха, находящегося внутри корпуса. В двигателях с h = 45... 180 мм воздух перемешивается вентиляционными лопатками замыкающих колец. В двигателях с h = 200...250 мм внутри корпуса вентиляционными лопатками создается направленная циркуляция воздуха. Для этого на внутренних ребрах подшипниковых щитов с обоих торцов сердечника ротора установлены диффузоры (см. рис. 9.12).

Диффузоры разделяют область пониженного давления — перед вентиляционными лопатками и повышенного давления — над лопатками. Воздух нагревается, соприкасаясь с замыкающими кольцами и вентиляционными лопатками ротора и лобовыми частями обмотки статора, проходит к внутренней поверхности корпуса, в полость между диффузором и внутренними ребрами подшипниковых щитов и отдает им тепло.

В двигателях с h = 280...355 мм с гофрированным корпусом (см. рис. 9.13) схема охлаждения отличается от рассмотренной выше. В сердечниках роторов этих двигателей выполнены аксиальные вентиляционные каналы, а внутри корпуса установлен центробежный вентилятор. Внутренний вентилятор прогоняет нагретый от лобовых частей обмоток ротора и статора воздух в полости, образованные ребрами гофрированного корпуса и наружной поверхностью сердечника статора. В то же время наружный вентилятор направляет холодный воздух, окружающий двигатель, вдоль ребер снаружи корпуса. Этим достигается более интенсивное охлаждение воздуха, заключенного внутри корпуса. Охлажденный воздух поступает в аксиальные каналы ротора и вновь к лопаткам внутреннего вентилятора.

В защищенном исполнении двигатели с короткозамкнутым ротором выпускаются в диапазоне осей вращения от 200 до 355 мм со степенью защиты IP23. Корпуса и подшипниковые щиты двигателей несколько отличны по своей конструкции от двигателей исполнения IP54. Это связано с изменением системы вентиляции. Двигатели имеют двустороннюю радиальную систему вентиляции. Нагнетательными элементами служат вентиляционные лопатки на замыкающих кольцах. Как и в двигателях исполнения по степени защиты IP54, лопатки служат также радиаторами, отводящими тепло от пазовой части стержней обмотки ротора. В двигателях с h = 200...250 мм (см. рис. 9.4) воздух засасывается через жалюзи в подшипниковых щитах торцов ротора, направляется диффузорами на вентиляционные лопатки ротора, охлаждает обмотку ротора и отбрасывается лопатками на лобовые части обмотки статора, обдувает внешнюю поверхность сердечника статора и выходит наружу через жалюзи в средней части корпуса двигателя. Корпуса двигателей этого отрезка

серии отлиты из чугуна и внутри имеют продольные ребра, которые служат для установки сердечника статора. Сердечник закреплен на ребрах эксцентрично по отношению к корпусу, и площадь поперечного сечения вентиляционных каналов сверху сердечника больше, чем снизу.

Корпуса двигателей с h = 280...355 мм, так же как и в аналогичных двигателях серии 4А (см. рис. 9.9), состоят из сварной полустанины, выполненной из стального листа, и штампованного из листовой стали верхнего кожуха. На полустанине имеются четыре вертикальные стойки, соединенные с основанием продольными планками, а сверху между собой продольными ребрами. В кольцевых проточках боковых ребер располагаются подшипниковые щиты. Сердечник статора устанавливают нижней половиной на центрирующие заточки внутренних стоек и крепят с помощью массивных нажимных колец. Вентиляция двигателей — радиальная двусторонняя. Циркуляция охлаждающего воздуха имеет такую же схему, как в двигателях исполнения со степенью защиты IP23 меньших высот оси вращения.

Асинхронные двигатели с фазными роторами выпускают как модификации серии АИР (АИС) в диапазоне высот оси вращения 160...355 мм в исполнениях по степени защиты IP44 — АИРФ (АИСФ) и IP23 — АИРНФ. Обмотки фазных роторов двигателей мощностью до 50...60 кВт выполнены из круглого провода, двухслойные, равнокатушечные с укороченным шагом. Пазы ротора — трапецеидальные, полузакрытые. В двигателях большей мощности обмотки стержневые волновые, пазы с параллельными стенками, полузакрытые с узким шлицем. В пазовой части обмотка закреплена клиньями, в лобовой части — бандажами из стальной проволоки или нетканой (бандажной) стеклоленты.

Напряжение на кольцах ротора у большинства двигателей примерно равно линейному напряжению обмотки статора.

Двигатели с фазными роторами со степенью защиты IP54 имеют ребристый корпус и охлаждаются наружным вентилятором, как и двигатели с короткозамкнутыми роторами. Контактные кольца расположены внутри корпуса (рис. 9.14) в полости, отделенной от статора перегородкой с лабиринтными уплотнениями, предотвращающими попадание пыли от щеток на обмотки статора и ротора.

Контактные кольца двигателей исполнения IP23 с высотой оси вращения 160...200 мм (рис. 9.15) установлены на выступающем конце вала, противоположном рабочему, и закрыты кожухом с отверстиями для прохода охлаждающего воздуха. Контактные кольца с токоотводами запрессованы в пластмассу. В пластмассовой части колец (рис. 9.16, а) имеются отверстия для прохода охлаждающего воздуха и вентиляционные лопатки для засасывания воздуха в пространство между кольцами. Выводные концы обмотки ротора подходят к контактным кольцам

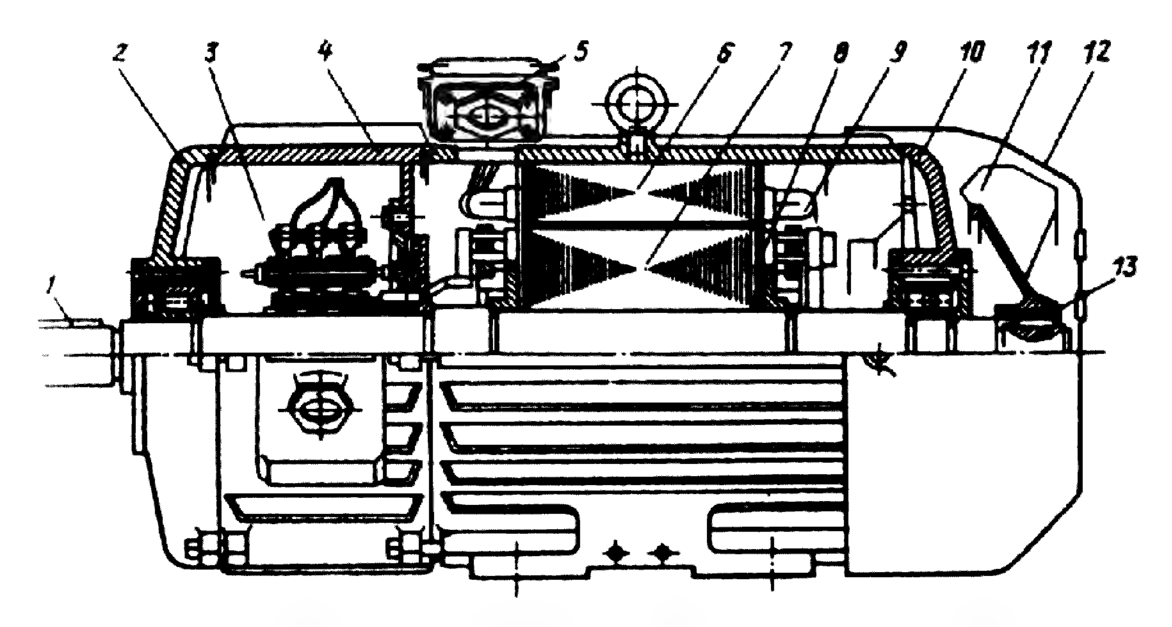


Рис. 9.14. Двигатель серии АИ с фазным ротором со степенью защиты IP54, h =180 мм:

1– вал; 2, 10 – подшипниковые щиты; 3 – контактные кольца; 4 – корпус; 5 – коробка выводов; 6 – сердечник статора; 7 – сердечник ротора; 8 – лобовые части обмотки ротора; 9 – лобовые части обмотки статора; 11 – вентилятор; 12 – кожух вентилятора; 13 – втулка вентилятора

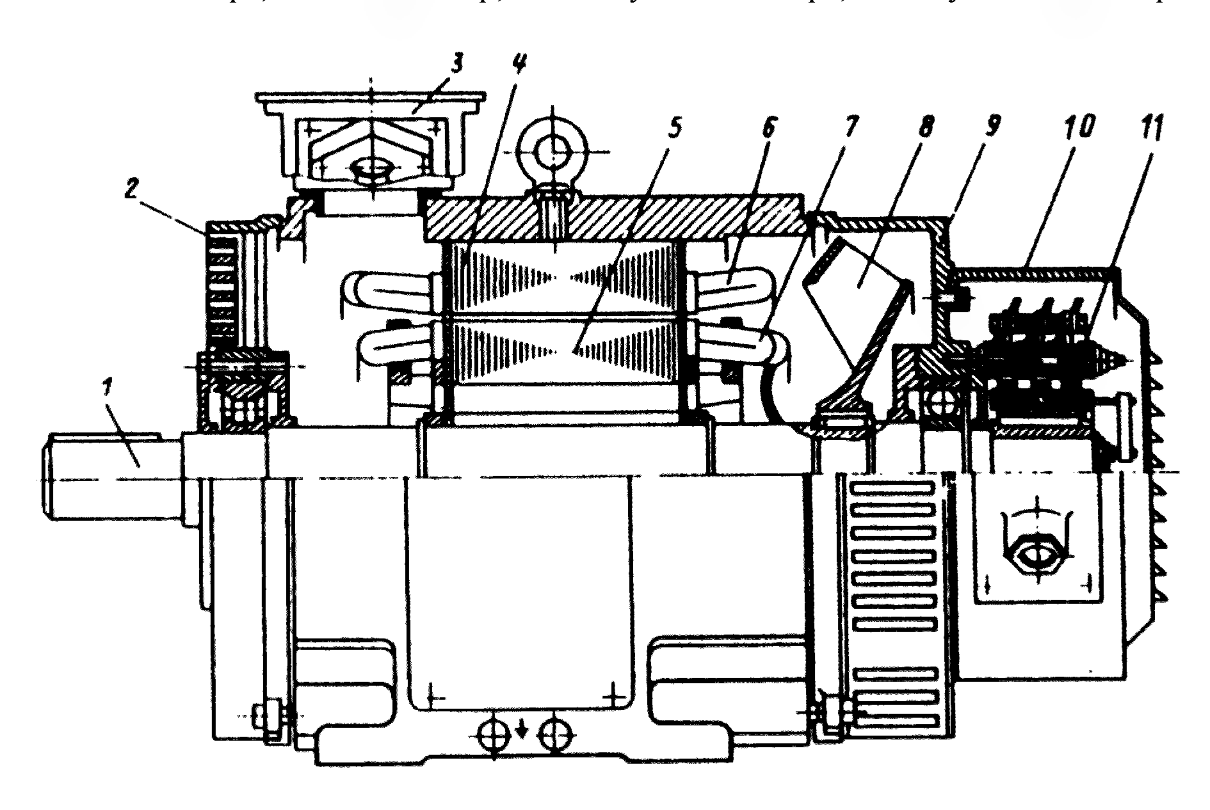


Рис. 9.15. Двигатель серии АИ с фазным ротором со степенью защиты IP23, h =180 мм, с аксиальной вентиляцией:

1 — вал; 2,9 — подшипниковые щиты; 3 — коробка выводов; 4 — сердечник статора; 5 — сердечник ротора; 6 — лобовые части обмотки статора; 7 — лобовые части обмотки ротора; 8 — вентилятор; 10 — кожух контактных колец; 11 — контактные кольца

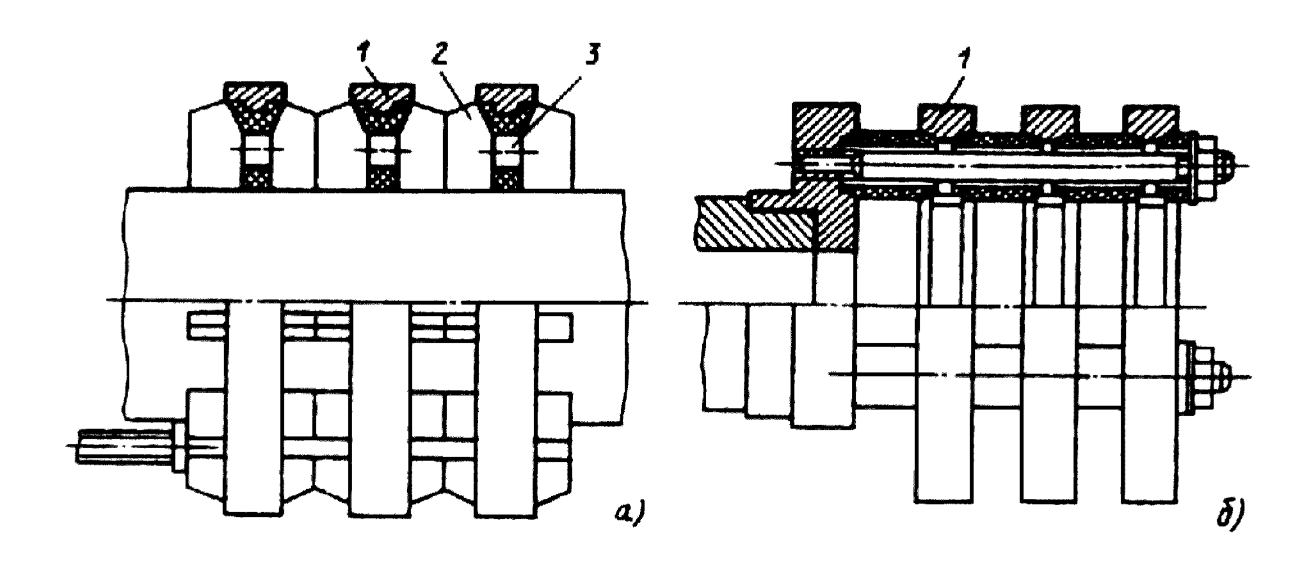


Рис. 9.16. Контактные кольца асинхронного двигателя с фазным ротором:
а — с посадкой на вал; б — консольное крепление; 1 — контактные кольца; 2 — вентиляционные лопатки; 3 — отверстия для прохода охлаждающего воздуха

через внутреннее отверстие на валу ротора.

Вентиляция двигателей — аксиальная. Центробежный вентилятор установлен рядом с сердечником ротора со стороны, противоположной рабочему концу вала. Охлаждающий воздух засасывается через жалюзи в подшипниковом щите, омывает лобовые части обмоток ротора и статора, наружную поверхность сердечника статора, лобовые части обмоток с другого торца сердечника и выбрасывается вентилятором через жалюзи в нижней части подшипникового щита. Часть воздуха проходит через аксиальные каналы в сердечнике статора и отводит тепло, выделяющееся в роторе.

В двигателях с h = 255...355 мм (см. рис. 9.5) вентиляция — радиальная, двусторонняя. Роторные вентиляторы расположены с двух сторон сердечника ротора. Контактные кольца укреплены на выступающем конце вала и закрыты кожухом. В двигателях с h = 280 мм их крепят консольно к несущему фланцу, установленному на валу с помощью трех шпилек (рис. 9.16, б). Токоподводы к обмотке ротора проходят через центральное отверстие в валу.

Большинство двигателей других модификаций и специализированных исполнений серии АИ выпускают со степенью защиты IP54 в тех или иных диапазонах высоты оси вращения. Они отличаются от рассмотренных либо отдельными конструктивными элементами, например, встроенным электромагнитным тормозом, либо схемами обмоток (многоскоростные двигатели), материалом заливки пазов или размерными соотношениями зубцовой зоны (двигатели с повышенным скольжением или пусковым моментом), либо усиленными уплотнениями вала, подшипниковых щитов, вводного устройства, а также защитными и лакокрасочными покрытиями и т. п. (двигатели тропического или химического исполнения).

Кроме единых серий асинхронных двигателей общего назначения выпускается ряд серий двигателей специального назначения, например крановые двигатели серии МТ, взрывозащищенные серии 2ВР и др. Асинхронные двигатели малой мощности для ручного электрифицированного инструмента, бытовой техники и специализированные для различного вида автоматических систем выпускаются электротехнической промышленностью в массовом количестве [15].

Вопросы проектирования асинхронных двигателей общего назначения рассматриваются ниже, в основном, на базе общесоюзных серий АИ и 4А.

9.4. НОВАЯ СЕРИЯ РА

Разработка новой серии асинхронных машин Российские асинхронные (РА) на Ярославском электромашиностроительном заводе (ЯЭМЗ) началась в 1992 г. Если до распада СССР созданием единых общесоюзных серий занимались около десятков НИИ и разработка единой серии занимала несколько лет, то коллективу ЯЭМЗ пришлось создавать новую серию в течение одного года [11].

В новую серию были заложены решения, позволившие изготавливать двигатели для любых требований потребителя. Это удалось создать благодаря применению конструкции станины со съемными лапами, которые фиксируются по четырем направлениям. Применение съемных лап, хотя и увеличивает трудоемкость, но позволяет несколько исполнений машины объединить в одной конструкции (фланцевое В5, на лапах В3 и на лапах с фланцем В35). Это приводит к значительной экономии оборотных средств завода, а потребитель может заменить поврежденную лапу новой, в то же время в конструкциях с постоянно прилитыми лапами их поломка приводит к замене всего двигателя.

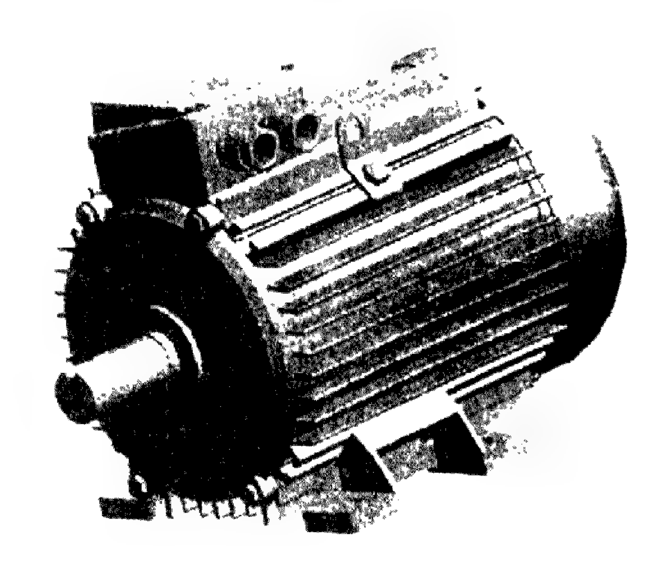


Рис. 9.17. Асинхронный двигатель новой серии РА

В серии RA станины для высот оси вращения 71...132 мм включительно — алюминиевые, получаемые экструзией, щиты также алюминиевые (рис. 9.17). Для высот оси вращения, больших 132 мм, станины и щиты выполняют чугунными. Все станины имеют горизонтально-вертикальное оребрение, что позволяет увеличить теплоотдачу

при снижении массы двигателя, а также улучшает эстетичность его формы. Особенно этому способствует экструзионная станина (см. рис. 9.17).

Внутренний диаметр сердечника статора D_1 выбран так, что при фиксированном наружном диаметре $D_{н1}$ оптимизирован весь ряд мощностей для нескольких высот оси вращения. Так, например, если для высот оси вращения 160 и 180 мм ($D_{н1}$ = 273 мм) при полюсности 2p = 6 выбран внутренний диаметр D_1 = 185 мм, то для последующего наружного диаметра 296 мм (высота оси вращения 200 и 225 мм) сохраняется тот же внутренний диаметр 185 мм, но уже для полюсности 2p = 4. Такая унификация предусмотрена для всей серии PA (табл. 9.6).

Таблица 9.6. Унификация серии PA

$D_{н1}$, мм	H, мм	Мощность на валу $P_{2ном}$, кВт, при синхронной скорости							
		3000 об/мин		1500 об/мин		1000 об/мин		750 об/мин	
		DIN	ГОСТ	DIN	ГОСТ	DIN	ГОСТ	DIN	ГОСТ
120	71	A 0,37 B 0,55	A 0,75 B 1,1	A 0,25 B 0,37	A 0,55 B 0,75	A 0,18 B 0,25	A 0,37 B 0,55	A 0,09 B 0,12	A 0,25 —
120 (140)	80	A 0,75 B 1,1	A 1,50 B 2,2	A 0,5 B 0,75	A 1,1 B 1,5	A 0,37 B 0,55	A 0,75 B 1,1	A 0,18 B 0,25	A 0,37 B 0,55
140	90	S 1,5 L 2,2	— L 3,0	S 1,1 L 1,5	— L 2,2	S 0,75 L 1,1	— L 1,5	B 0,37 L 0,55	LA 0,75 LB 1,1
150 (140)	100	— L 3,0	S 4,0 L 5,5	LA 2,2 LB 3,0	S 3,0 L 4,0	— L 1,5	— L 2,2	LA 0,75 LB 1,1	— L 1,5
176 (206)	112	M 4,0	M 7,5	M 4,0	M 5,5	M 2,2	MA 3,0 MB 4,0	M 1,5	MA 2,2 MB 3,0
206	132	SA 5,5 SB 7,5	— M 11,0	S 5,5 M 7,5	S 7,5 M 11,0	S 3,0 MA 4,0 MB 5,5	S 5,5 M 7,5	S 2,2 M 3,0	S 4,0 M 5,5
273	160	MA 11,0 MB 15,0 L 18,5	S 15,0 M 18,5	M 11,0 L 15,0	S 15,0 L 18,5	M 7,5 L 11,0	S 11,0 M 15,0	MA 4,0 MB 5,5 L 7,5	S 7,5 M 11,0
296 (273)	180	M 22,0 —	S 22,0 M 30,0	M 18,5 L 22,0	S 22,0 M 30,0	— L 15,0	M 18,5 —	— L 11,0	M 15,0 —
296	200	LA 30,0 LB 37,0	M 37,0 L 45,0	— L 30,0	M 37,0 L 45,0	LA 18,5 LB 22,0	M 22,0 L 30,0	— L 15,0	M 18,5 L 22,0
344 (296)	225	— M 45,0	— M 55,0	S 37,0 M 45,0	— M 55,0	— M 30,0	— M 37,0	S 18,5 M 22,0	— M 30,0
400 (344)	250	— M 55,0	S 75,0 M 90,0	— M 55,0	S 75,0 M 90,0	— M 37,0	S 45,0 M 55,0	— M 30,0	S 37,0 M 45,0
400	280	S 75,0 M 90,0	S 110 M 132	S 75,0 M 90.0	S 110 M 132	S 45,0 M 55,0	S 75,0 M 90,0	S 37,0 M 45,0	S 55,0 M 75,0

Примечание. Буквенные обозначения в соответствии с серией 4А.

Вопросам унификации в новой серии РА уделено особое внимание, поскольку только на одной высоте оси вращения количество типоисполнений двигателей превышает несколько тысяч. Основным достоинством серии РА является возможность выпуска асинхронных двигателей, удовлетворяющих требованиям ГОСТ, DIN и SENELBC и при максимальной унификации отдельных узлов и дешей машины [11].

Внедрение профильной экструзионной станины в серии РА позволило снизить трудоемкость изготовления, повысить качество и снизить массу двигателя за счет лучшего теплосъема с поверхности станины. Экструзионные станины позволили отказаться от чистовой обработки замков статора, а также уменьшить аксиальную длину станины, так как они нарезаются из заготовки, получаемой с металлургических заводов.

Применение экструзионных станин на ЯЭМЗ ограничивалось диаметром 132 мм из-за технологических возможностей завода, но такие станины могут применяться и для больших высот, если это потребуется заказчикам.

Основной недостаток экструзионных станин — их более высокая стоимость по сравнению с литыми станинами.

В табл. 9.7 приведены основные показатели трехфазных асинхронных двигателей серии РА с короткозамкнутым ротором (степень защиты IP44, IP34, $U_{1л} \leq 660$ В).

Таблица 9.7. Показатели трехфазных асинхронных двигателей серии РА с короткозамкнутым ротором (степень защиты IP44, IP54, $U \leq 660$ В)

Тип АД	2p	$P_{2н}$, кВт	B_δ, Тл	A_1 А/см	J_1, А/мм^2	$\eta_н$, %	$\cos\varphi_н$	$D_{н1}$	D_1	l_1	S	Z_1/Z_2
								мм				
РА71	2	0,55	0,90	173	7,0	72,0	0,80	120	62	50	0,3	24/17
	4	0,37	0,85	210	5,7	65,0	0,66		70	55	0,3	24/17
	6	0,25	0,83	220	6,2	60,0	0,55		70	55	0,3	36/28
РА80	2	1,1	0,85	208	8,2	75,0	0,87	120	62	75	0,3	24/17
	4	0,75	0,87	225	8,0	73,0	0,70	140	90	50	0,3	36/28
	6	0,55	0,80	228	8,3	67,0	0,66	140	95	55	0,3	36/28
РА90	2	2,2	0,83	235	6,7	84,0	0,88	140	76	82	0,3	24/17
	4	1,5	0,77	224	7,9	78,0	0,80		90	90	0,4	36/28
	6	1,1	0,80	228	8,0	73,0	0,73		95	95	0,3	36/28
РАIOO	2	3,0	0,89	265	7,2	83,0	0,86	140	76	95	0,3	24/17
	4	3,0	0,80	220	7,5	82,0	0,81		90	130	0,4	36/28
	6	1,5	0,79	251	8,0	75,0	0,75		95	125	0,3	36/28
РА112	2	4,0	0,66	230	5,8	83,5	0,88	206	117	90	0,6	36/28
	4	4,0	0,75	260	5,0	86,5	0,84		129	90	0,45	36/28
	6	2,2	0,80	241	7,2	79,5	0,79		145	70	0,35	54/44
РА 132	2	7,5	0,68	215	5,8	87,0	0,89	206	117	130	0,6	36/28
	4	7,5	0,87	289	5,5	88,5	0,84		129	145	0,45	36/28
	6	5,5	0,83	279	8,0	82,0	0,78		145	140	0,35	54/44

Продолжение табл. 9.7

Тип АД	2p	$P_{2н}$, кВт	B_δ, Тл	A_1 А/см	J_1, А/мм^2	$\eta_н$, %	cos $\varphi_н$	$D_{н1}$	D_1	l_1	S	Z_1/Z_2
								мм				
РА160	2	15,0	0,80	290	5,2	90,0	0,90	273	155	110	0,8	36/28
	4	15,0	0,80	329	5,3	90,0	0,87		172	130	0,5	48/38
	6	11,0	0,90	300	5,6	87,5	0,83		185	140	0,45	54/50
РА 180	2	22,0	0,80	300	5,4	91,0	0,90	273	155	180	0,8	36/28
	4	22,0	0,86	345	5,5	91,0	0,88		172	185	0,5	48/38
	6	15,0	0,90	313	5,7	89,5	0,80		185	180	0,45	54/50
РА200	2	37,0	0,73	344	4,0	90,5	0,89	296	163	215	0,9	36/28
	4	30,0	0,81	385	4,9	91,5	0,83		185	200	0,55	48/40
	6	22,0	0,77	350	5,2	89,0	0,85		209	210	0,45	72/56
РА225	2	45,0	0,67	348	4,2	92,0	0,90	296	163	265	0,9	36/28
	4	45,0	0,85	392	4,7	92,0	0,87		185	290	0,55	48/40
	6	30,0	0,82	400	5,3	89,5	0,86		209	240	0,45	72/56
РА250	2	55,0	0,67	355	3,8	93,0	0,92	344	190	240	1,1	48/40
	4	55,0	0,98	362	6,1	92,5	0,88	400	240	200	0,8	60/50
	6	37,0	0,75	377	5,7	90,5	0,85	344	240	240	0,6	72/56

Освоение серии РА позволило сократить зависимость России от импорта и развить экспорт асинхронных двигателей. Технико-экономические показатели двигателей серии РА соответствуют или превосходят лучшие аналоги зарубежных фирм, а цены на продукцию значительно ниже, чем у конкурентов.

9.5. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ И РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА

Техническое задание на учебное проектирование асинхронного двигателя содержит номинальные данные проектируемой машины и указания о режиме ее работы, исполнении по способу монтажа, степени защиты от воздействия окружающей среды и системе охлаждения. Кроме того, могут быть заданы также дополнительные требования к проектируемому двигателю, например наименьшие допустимые значения кратности максимального и минимального моментов, а для двигателей с короткозамкнутыми роторами также предельные значения пускового тока и наименьшие значения пусковых моментов. В отношении требований, не оговоренных в задании, спроектированная машина должна удовлетворять соответствующим ГОСТам. Методические указания к курсовому проекту см. в § 1.6.

Проектирование новой машины начинают с выбора базовой модели, на которую ориентируются при проведении всех расчетов, начиная с выбора главных размеров, и при разработке конструкции отдельных узлов. За базовую обычно выбирается конструкция двигателя одной из новых серий, выпускаемых в настоящее время. Например, при проектировании асинхронных двигателей общего назначения малой и средней мощности (до 400 кВт) в качестве

базовой модели следует выбирать конструкцию двигателей серии 4А или АИ и исполнения, предусмотренного в техническом задании.

В начальной стадии проектирования при выборе главных размеров и электромагнитных нагрузок необходимо учесть дополнительные требования технического задания. Если проектируемая машина должна иметь большой максимальный момент, то индуктивное сопротивление ее обмоток не должно быть большим, поэтому в такой машине нецелесообразно выбирать малое значение индукций, большую линейную нагрузку, узкие и глубокие пазы и т.п.

Требования к пусковым характеристикам с короткозамкнутым ротором следует обязательно учитывать при выборе конфигурации пазов ротора. Так, узкие и глубокие пазы с сужающейся верхней частью обеспечивают большое увеличение расчетного активного сопротивления ротора при пуске и большие пусковые моменты, но при таких пазах возрастает индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора и уменьшаются перегрузочная способность двигателя и коэффициент мощности при номинальном режиме.

Полностью учесть все требования технического задания к характеристикам двигателя при выборе размеров магнитопровода и обмотки машины, не ориентируясь на данные выпущенных машин, невозможно. Поэтому перед началом расчета следует детально и изучить конструкцию базового двигателя, критически оценить принятые в ней соотношения размеров, уровни электромагнитных нагрузок и другие данные и лишь после этого приступить к расчету. Расчет асинхронных машин начинают с определения главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчетной длины магнитопровода l_δ. Размеры D и l_δ связаны с мощностью, угловой скоростью и электромагнитными нагрузками выражением машинной постоянной:

$$\frac{D^2 l_\delta \Omega}{P'} = \frac{2}{\pi \alpha_\delta k_B k_{об} A B_\delta}. \qquad (9.1)$$

В начале расчета двигателя все величины, входящие в (9.1), кроме синхронной угловой скорости, неизвестны. Поэтому расчет проводят, задаваясь на основании имеющихся рекомендаций значениями электромагнитных нагрузок (A и B_δ), коэффициентов (α_δ, k_B и $k_{об}$), и приближенно определяют расчетную мощность P’. Остаются два неизвестных (D и l_δ), однозначное определение которых без дополнительных условий невозможно. Таким условием является отношение l_δ/D или более употребительное в расчетной практике отношение $\lambda = l_\delta / \tau$. Это отношение в

значительной степени определяет экономические данные машин, а также оказывает влияние на характеристики и условия охлаждения двигателей.

У большинства выпускаемых асинхронных двигателей общего назначения отношение λ, изменяется в достаточно узких пределах. Поэтому для определения D и l_δ можно предварительно выбрать то или иное отношение λ, характерное для заданного исполнения и числа полюсов машины. Это позволит однозначно определить главные размеры, исходя из (9.1). Однако внутренний диаметр статора непосредственно связан определенными размерными соотношениями с внешним диаметром статора D_a, в свою очередь, определяющим высоту оси вращения h, значение которой при проектировании новых двигателей может быть принято только из стандартного ряда высот, установленных ГОСТом.

Внешний диаметр статора должен также соответствовать определенным условиям, налагаемым требованиями раскроя листов электротехнической стали с наименьшими отходами при штамповке. С учетом этих требований при ручном расчете асинхронного двигателя более целесообразным является выбор главных размеров, основанный на предварительном определении высоты оси вращения, увязке этого размера с внешним диаметром статора и последующем расчете внутреннего диаметра статора D.

В связи с этим выбор главных размеров проводят в следующей последовательности.

Высоту оси вращения предварительно определяют по рис. 9.18, а или б для заданных P_2 и $2p$ в зависимости от исполнения двигателя.

Из ряда высот осей вращения (см. табл. П 6.2) принимают ближайшее к предварительно найденному меньшему стандартному значению h. Следует иметь в виду, что ГОСТ определяет стандартные высоты осей вращения независимо от назначения и конструктивного исполнения асинхронных двигателей, поэтому высота оси вращения любого проектируемого двигателя должна быть равна одному из этих значений.

Зависимость (9.1) показывает, что при одной и той же длине l мощность P' изменяется пропорционально D^2. Поэтому машину при выбранной высоте оси вращения выгодно выполнять с возможно большим диаметром. Максимально возможный диаметр D_a должен быть $D_a \leq 2(h - h_{1min})$, где h_{1min} — минимальное расстояние от стали сердечника статора до опорной плоскости машины (рис. 9.19), включающее толщину корпуса $b_{корп}$ и расстояние от корпуса до опорной плоскости h_2. Если машина выполняется со сварной станиной, то допустимое расстояние h_{1min} уменьшается. В том случае, когда $h_1 >> h_{1min}$, в нижней части корпуса оребренных двигателей исполнения со степенью защиты IP44 размещают несколько охлаждающих ребер, высота которых может быть меньше, чем у расположенных на верхней и боковых частях корпуса.

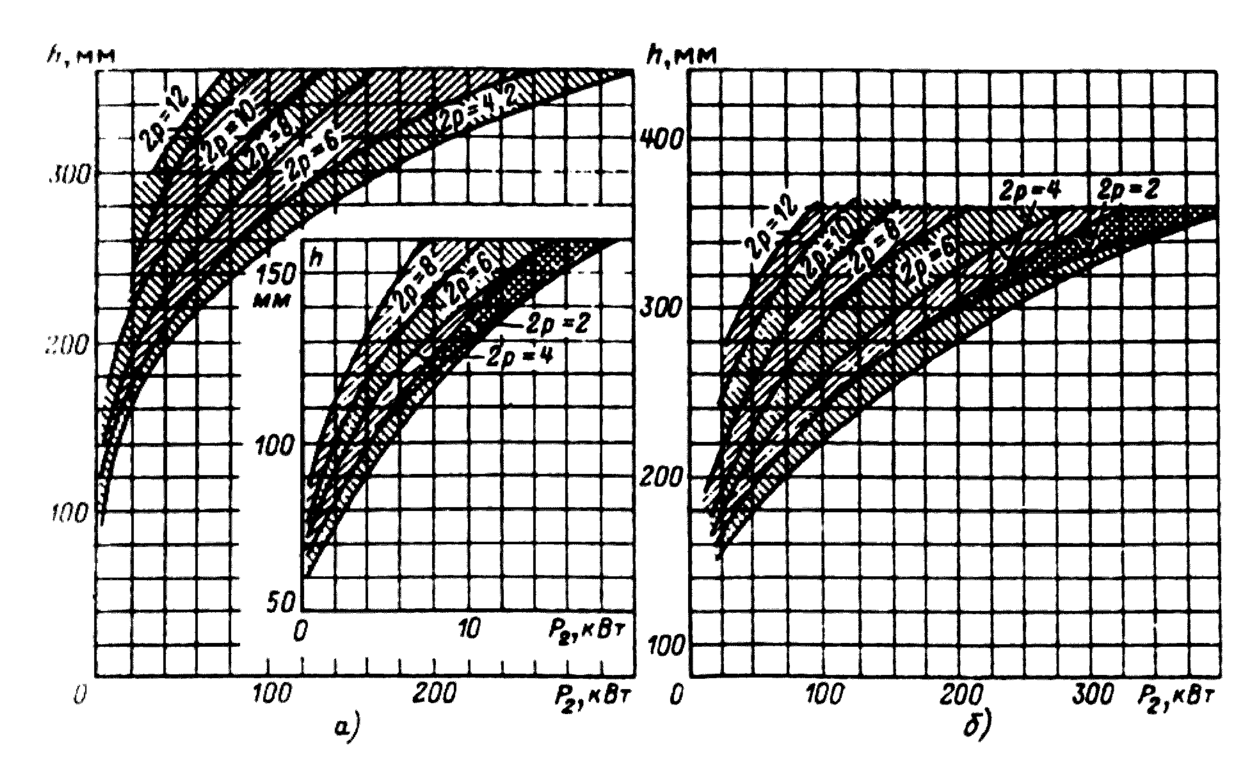


Рис. 9.18. Высота оси вращения h двигателей различных мощности и частоты вращения: а — со степенью защиты IP44; б — со степенью защиты IP23

Обычно расстояние h_1 выбирают равным или несколько большим h_{1min}, значения которого для двигателей с различной высотой оси вращения h приведены на рис. 9.19. При выборе D_a должно быть учтено также требование использования для штамповки рулонной или листовой электротехнической стали стандартных размеров с наименьшими отходами.

Внешние диаметры сердечников статоров двигателей серий в зависимости от высоты оси вращения при учебном проектировании могут быть приняты по данным табл. 9.8.

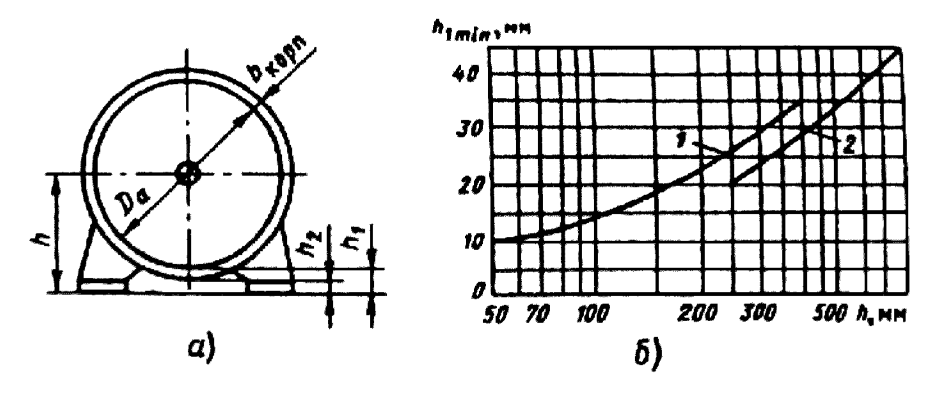


Рис. 9.19. К выбору наружного диаметра D_c статора (а). Минимально допустимое расстояние h_1 от сердечника статора до опорной поверхности двигателя в зависимости от высоты оси вращения двигателей со станиной (б):
1 — литой; 2 — сварной

Таблица 9.8. Внешние диаметры статоров асинхронных двигателей различных высот оси вращения

h, мм	56	63	71	80	90	
Da, мм	0,08— 0,096	0,1—1,08	0,116—0,122	0,131—0,139	0,149—0,157	
h, мм	100	112	132	160	180	
Da, мм	0,168—0,175	0,191-0,197	0,225—0,233	0,272—0,285	0,313—0,322	
h, мм	200	225	250	280	315	255
D_a, мм	0,349—0,359	0,392—0,406	0,437—0,452	0,52-0,53	0,59	0,66

Внутренний диаметр статора D в общем случае можно определить по внешнему диаметру, высотам ярма (h_a) и зубцов (h_z) статора:

$$D = D_a - 2(h_a + h_z).$$

На данном этапе расчета размеры h_a и h_z неизвестны. Поэтому для определения D используют эмпирические зависимости. При одном и том же уровне индукции на участках магнитопровода в машинах с одинаковым D высота ярма статора будет пропорциональна потоку, а следовательно, обратно пропорциональна числу полюсов машины (прямо пропорциональна полюсному делению). Принимая, что размеры пазов не зависят от числа полюсов машины, получаем приближенное выражение

$$D = K_D D_a. \tag{9.2}$$

Значения коэффициентов K_D, приведенные в табл. 9.9, характеризуют отношения внутренних и внешних диаметров сердечников статоров асинхронных двигателей серий 4А и АИ при различных числах полюсов и могут быть использованы для предварительного определения D вновь проектируемой машины.

Таблица 9.9. Отношение $K_D = D/D_a$, в асинхронных двигателях в зависимости от числа полюсов

2p	2	4	6	8	10—12
K_D	0,52—0,6	0,62—0,68	0,7—0,72	0,72—0,75	0,75—0,77

Далее находят полюсное деление τ, м:

$$\tau = \pi D/2p \tag{9.3}$$

и расчетную мощность Р, В·А:

$$P' = mIE = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos\varphi} \tag{9.4}$$

где P_2 — мощность на валу двигателя, Вт; k_E — отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, которое может быть приближенно определено по рис. 9.20.

Предварительные значения η и cosφ, если они не указаны в задании на проектирование, находятся по ГОСТу. Приближенные значения η и cosφ могут быть приняты по кривым рис. 9.21.

Предварительный выбор электромагнитных нагрузок A, А/м, и B_δ, Тл, должен быть проведен

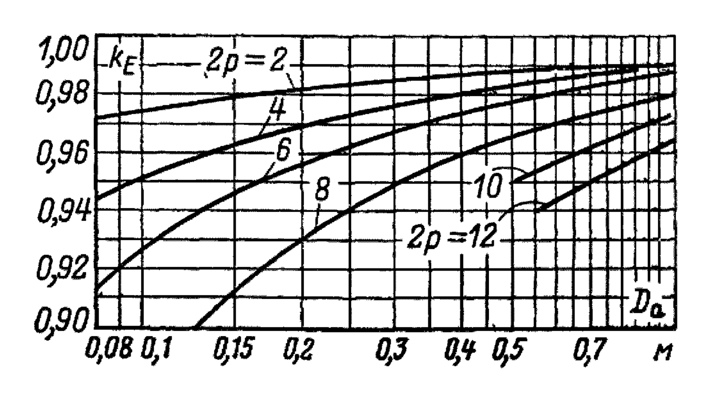
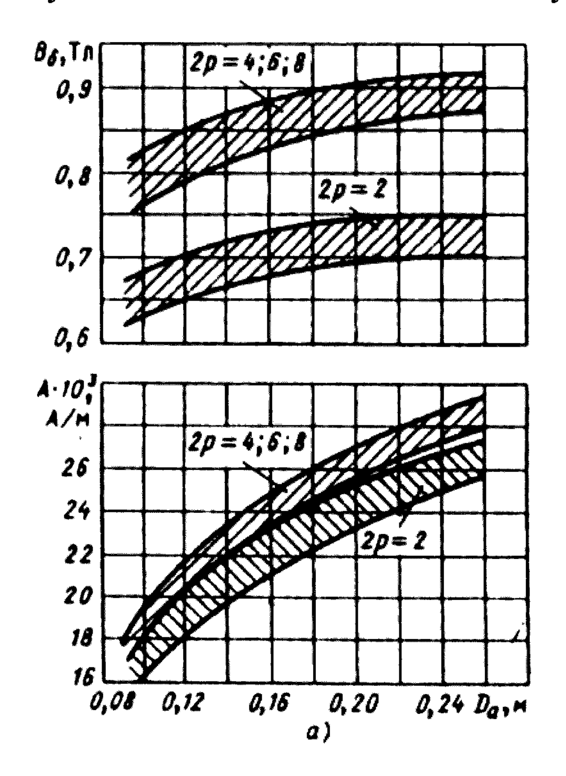
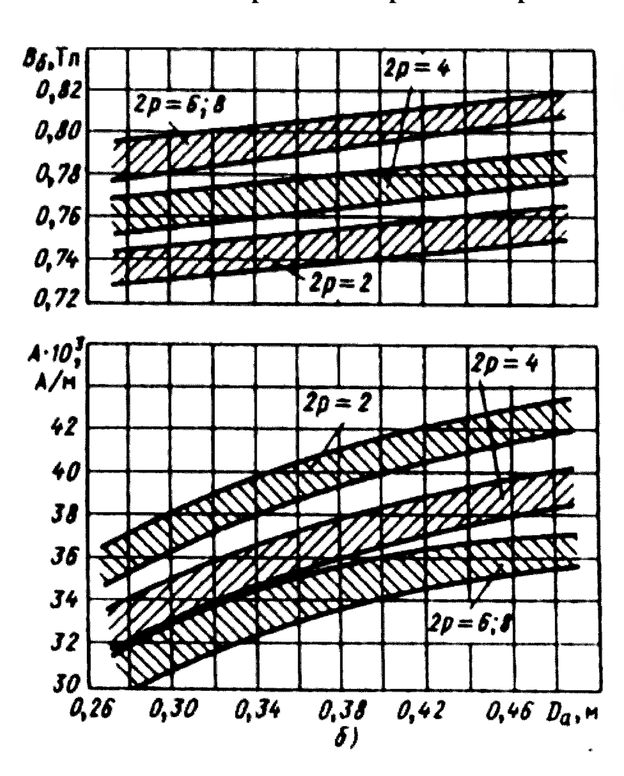


Рис. 9.20. Значения коэффициента K_E

Рис. 9.21. Примерные значения КПД и cos φ асинхронных двигателей:
а — со степенью защиты IP44 и мощностью до 30 кВт; б — со степенью защиты IP44 и мощностью до 400 кВт; в — со степенью защиты IP23

особо тщательно, так как они определяют не только расчетную длину сердечника, но и в значительной степени характеристики машины. При этом если главные размеры машины зависят от произведения AB_δ [см. (9.1)], то на характеристики двигателя оказывает существенное влияние также и соотношение между этими величинами. Рекомендации по выбору A и B_δ представлены в виде кривых на рис. 9.22—9.24 для машин различных мощности и исполнения. На каждом из рисунков даются области их допустимых значений. При выборе конкретных





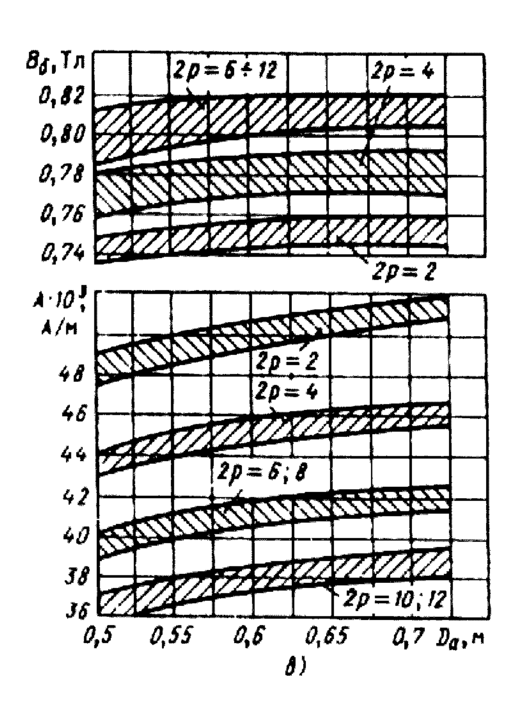


Рис. 9.22. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей со степенью защиты IP44 при высоте оси вращения:
а – h ≥ 132 мм; б – h = 150…250 мм; в – h ≥ 280 мм (с продуваемым ротором)

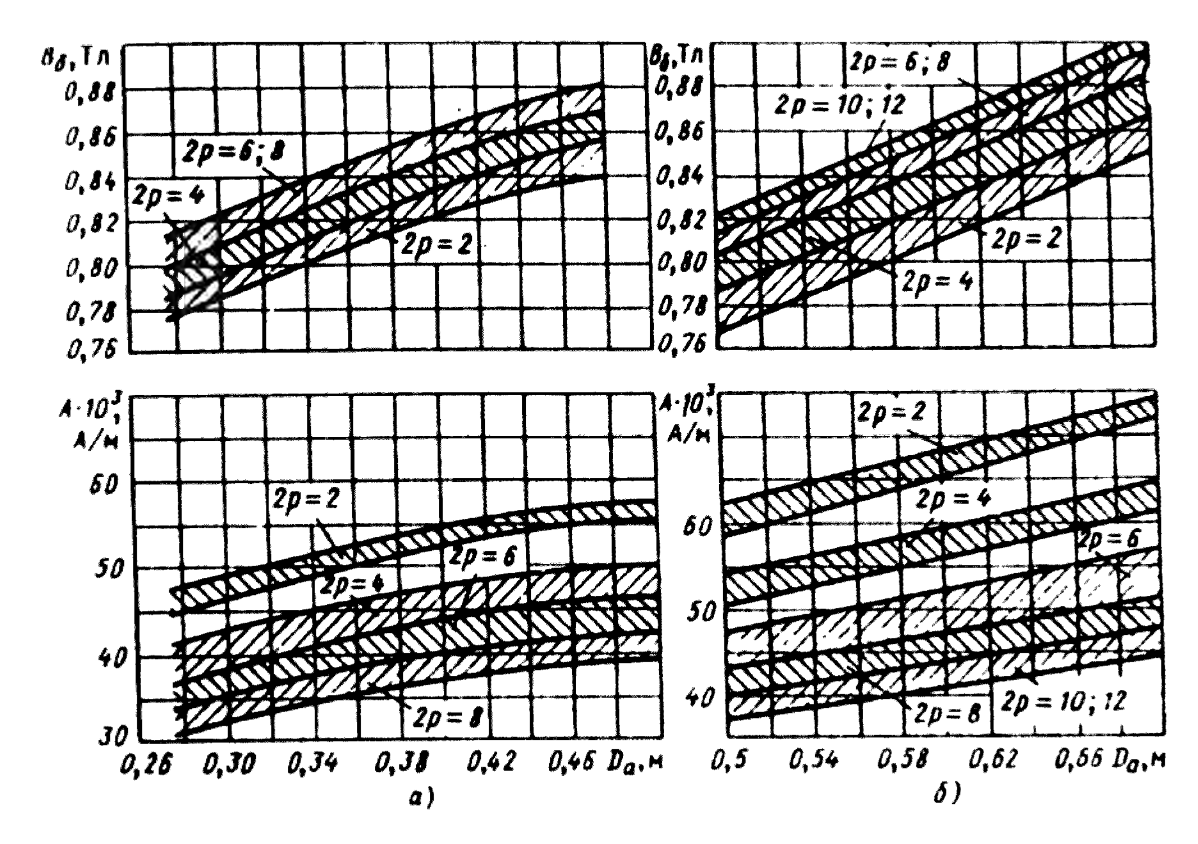


Рис. 9.23. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей со степенью защиты IP23 при высоте оси вращения:
а – h = 160…250 мм; б – h ≥ 280 мм

значений A и B_δ в пределах рекомендуемой области следует, руководствуясь приведенными выше замечаниями, учитывать требования технического задания к характеристикам проектируемого двигателя.

Коэффициент полюсного перекрытия α_δ и коэффициент формы поля $k_В$ в асинхронных машинах определяются степенью уплощения кривой поля в зазоре, возникающей при насыщении зубцов статора и ротора, и могут быть достаточно достоверно определены топько после расчета магнитной цепи. Поэтому для расчета магнитной цепи удобнее рассматривать синусоидальное поле, а влияние уплощения учесть при расчете магнитного напряжения отдельных участков магнитной цепи.

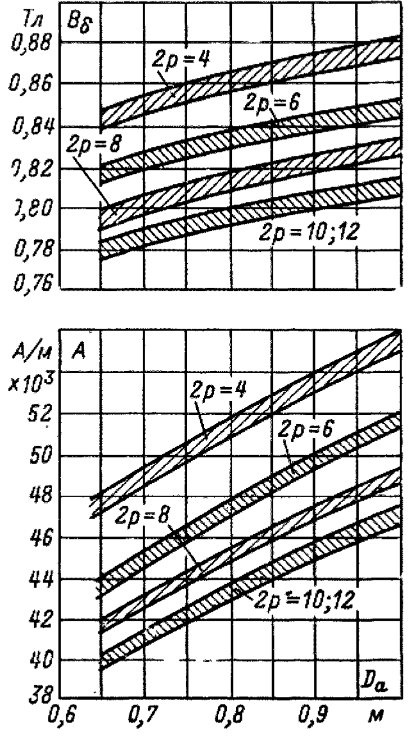


Рис. 9.24. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей высокого напряжения со степенью защиты IP23

Основываясь на этом, значения коэффициентов предварительно принимают равными:

$$\alpha_\delta = 2/\pi \approx 0{,}64; \quad k_B = \pi/(2\sqrt{2}) = 1{,}11.$$

Предварительное значение обмоточного коэффициента $k_{об1}$ выбирают в зависимости от типа обмотки статора. Для однослойных обмоток $k_{об1}$ = 0,95...0,96. Для двухслойных и одно-двухслойных обмоток при 2р = 2 следует принимать $k_{об1}$ = 0,90... 0,91 и при большей полюсности $k_{об1}$ = 0,91. ..0,92.

Синхронная угловая частота двигателя Ω, рад/с, рассчитывается по формуле

$$\Omega = 2\pi\frac{n_1}{60} \quad \text{или} \quad \Omega = 2\pi\frac{f_1}{p} \tag{9.5}$$

где n_1 — синхронная частота вращения, об/мин; f_1 — частота питания, Гц.

Из (9.1), с учетом значения α_δ, расчетная длина магнитопровода, м,

$$l_\delta = \frac{P'}{D^2 \Omega k_B k_{об1} A B_\delta}. \tag{9.6}$$

Критерием правильности выбора главных размеров D и l_δ служит отношение $\lambda = l_\delta/\tau$, которое обычно находится в пределах, показанных на рис. 9.25 для принятого исполнения машины. Если λ оказывается чрезмерно большим, то следует повторить расчет для ближайшей из стандартного рада большей высоты оси вращения А. Если К слишком мало, то расчет повторяют для следующей в стандартном раду меньшей высоты h.

На этом выбор главных размеров заканчивается. В результате проделанных вычислений получены значения высоты оси вращения h, внутреннего диаметра статора D, внешнего диаметра статора D_a, расчетной длины магнитопровода l_δ и полюсного деления τ.

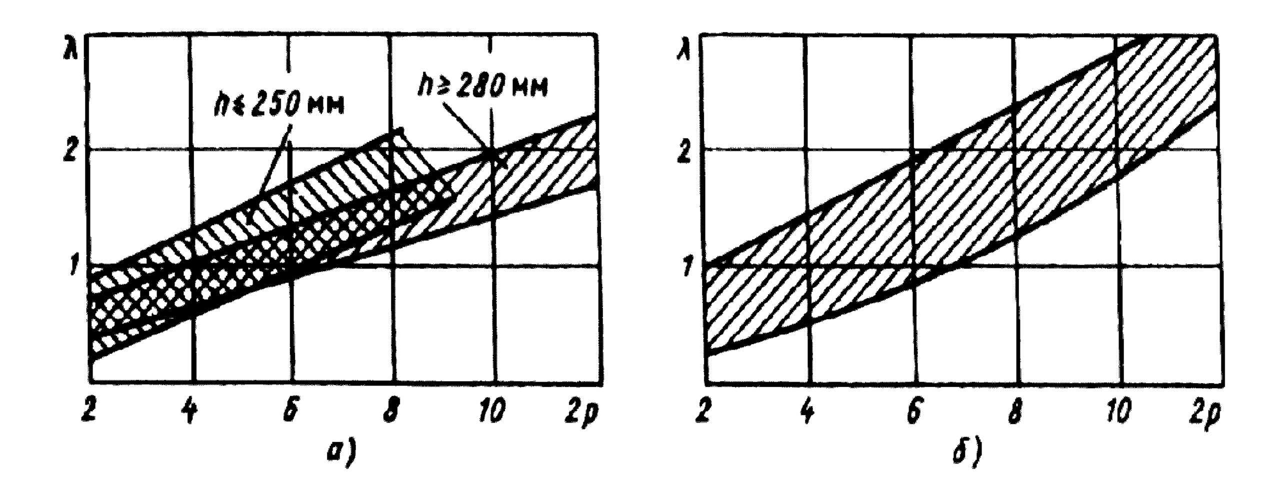


Рис. 9.25. Отношение $\lambda = l_\delta/\tau$ у двигателей исполнения по степени защиты:
а – IP44; б – IP23

Для расчета магнитной цепи помимо l_δ необходимо определить ценностью конструктивную длину и длину стали сердечников статора (l_1 и $l_{ст1}$) и ротора (l_2 и $l_{ст2}$). В асинхронных двигателях, длина сердечников которых не превышает 250. ..300 мм, радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции

$$l_1 = l_{ст1} = l_\delta. \tag{9.7}$$

В более длинных машинах сердечники подразделяют на отдельные пакеты, разделенные между собой радиальными вентиляционными каналами. В двигателях с фазными роторами или со сварной короткозамкнутой обмоткой пакеты выполняют длиной 40...60 мм. Крайние пакеты могут быть более длинными. В двигателях с литой короткозамкнутой обмоткой ротора число пакетов по технологическим соображениям из-за сложности заливки уменьшают и пакеты выполняют более длинными.

Стандартная ширина радиального воздушного канала между пакетами $b_к$ = 10 мм. Число пакетов $n_{пак}$ и их длина $l_{пак}$ связаны с расчетной длиной следующим соотношением:

$$n_{пак} = l_{ст} / l_{пак} \approx l_\delta / l_{пак} \quad \text{целое число,} \tag{9.8}$$

при этом число радиальных каналов $n_к = n_{пак - 1}$.

Длина стали сердечника статора в таких машинах

$$l_{ст1} = l_{пак}\, n_{пак}, \tag{9.9}$$

или при пакетах разной длины

$$l_{ст1} = \sum l_{пак} \tag{9.10}$$

Конструктивная длина сердечника статора

$$l_1 = l_{ст1} + b_к\, n_к. \tag{9.11}$$

Окончательное значение l_δ для машин с $\delta < 1{,}5$ мм

$$l_\delta \approx l_{ст1}. \tag{9.12}$$

В машинах с $\delta \geq 1{,}5$ мм при расчете l_δ учитывают искривление магнитных силовых линий потока в воздушном зазоре над радиальными вентиляционными каналами (см. § 4.2):

$$l_\delta \approx l_1 - b'_к\, n_к, \tag{9.13}$$

где $b'_к$ — расчетная ширина радиальных каналов, зависящая от соотношения δ и $\delta_к$. Значение $b'_к$ при $b_к$ = 10 мм определяется по табл. 9.10 либо из выражения

$$b'_к = \gamma'\delta \tag{9.14}$$

Таблица 9.10. Расчетная ширина радиальных каналов ft; при Ь* = 10 мм

δ, мм	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,5	3,0
$b'_к$, мм	7,3	7,1	7,0 _	6,9	6,8	6,7	6,2	5,7

где

$$\gamma' = \frac{2(b_k/\delta)^2}{5+2(b_k/\delta)}.$$

Конструктивную длину сердечника ротора в машинах с h < 250 мм берут равной длине сердечника статора, т. е. $l_2 = l_1$. В двигателях больших габаритов ротор выполняют длиннее статора за счет увеличения длины его крайних пакетов на 5 мм и в крупных машинах высокого напряжения — на 10 мм.

Длина стали сердечника ротора

$$l_{ст2} \quad \sum l_{паk2} \quad l_2 \quad n_k b_k \qquad (9.15)$$

Следующий этап расчета включает определение числа пазов статора Z_1 и числа витков в фазе обмотки статора w_1. При этом число витков фазы обмотки статора должно быть таким, чтобы линейная нагрузка двигателя и индукция в воздушном зазоре как можно более близко совпадали с их значениями, принятыми предварительно при выборе главных размеров, а число пазов статора обеспечивало достаточно равномерное распределение катушек обмотки.

Чтобы выполнить эти условия, вначале выбирают предварительно зубцовое деление t_{z1}, в зависимости от типа обмотки, номинального напряжения и полюсного деления машины. Для более равномерного распределения катушек обмотки по длине окружности зазора необходимо большое число пазов, а следовательно, маленькие зубцовые деления. В то же время ширина паза, составляющая примерно половину зубцового деления, не должна быть слишком малой, так как в этом случае ухудшается заполнение паза медью обмотки, а в машинах небольшой мощности может также недопустимо уменьшиться механическая прочность зубцов. Кроме того, надо иметь в виду, что стоимость машины с увеличением числа пазов возрастает, так как увеличиваются сложность штампа и трудоемкость изготовления и укладки обмоток.

Значения зубцовых делений статора асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода, необходимые для предварительного выбора числа пазов, приведены на рис. 9.26. Меньшие значения в каждой из показанных на рисунке областей возможных значений t_{z1} характерны для машин меньшей мощности для каждого из диапазонов высот осей вращения. Следует отметить, что двигатели с $h \geq 280$ мм обычно выполняют с обмоткой из прямоугольного провода, но в

многополюсном исполнении при 2p ≥ 10 (в двигателях с h = 280 и 315 мм) из-за малой высоты спинки статора размещение лобовых частей катушек из прямоугольного провода затруднено, поэтому такие машины выполняют с намоткой из круглого провода, имеющей мягкие, легко поддающиеся формовке лобовые части.

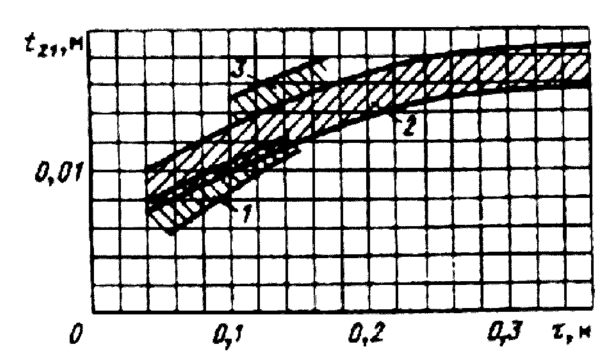


Рис. 9.26. Зубцовые деления статоров асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода с высотами оси вращения: 1 – h < 90 мм; 2 – 90 < h < 250 мм; 3 – h < 280 мм

Для машин с обмоткой из прямоугольного провода при $U_{ном}$ ≤ 660 В и в высоковольтных машинах t_{z1} зависит от мощности и номинального напряжения и может быть взято в соответствии с данными табл. 9.11. В процессе расчета целесообразно не ограничиваться выбором какого-либо одного конкретного зубцового деления, а, руководствуясь приведенными выше соображениями, рассмотреть диапазон возможных значений t_{z1} в пределах указанных значений зубцовых делений t_{z1min}...t_{z2max}. Тогда возможность числа пазов статора, соответствующих выбранному диапазону t_{z1},

$$Z_{1\min}\cdots Z_{1\max}=\frac{\pi D}{t_{z1\max}}\cdots\frac{\pi D}{t_{z2\min}} \quad (9.16)$$

Таблица9.11. Зубцовое деление статора fzi, м, при прямоугольных пазах

Полюсное деление τ, м	Напряжение, В		
	до 660	3000	6000
Менее 0,15	0,016—0,02	0,022—0,025	0,024—0,03
0,15—0,4	0,017—0,022	0,024—0,027	0,026—0,024
Более 0,4	0,02—0,028	0,026—0,032	0,028—0,038

Окончательное число пазов статора Z_1 следует выбирать в полученных пределах с учетом условий, налагаемых требованиями симметрии обмотки, и желательного для проектируемой машины значения числа пазов на полюс и фазу q_1. Число пазов статора в любой обмотке асинхронных машин должно быть кратно числу фаз, а число $q_1 = Z_1/(2pm)$ в большинстве асинхронных машин должно быть целым. Лишь в многополюсных асинхронных двигателях иногда выполняют такое число пазов, при котором q_1 является дробным, причем большей частью со знаменателем дробности, равным двум, например $q_1 = 2\,^1/_2$ или $3\,^1/_2$. В отдельных случаях это правило может быть нарушено, однако необходимо иметь в виду, что обмотки с дробным q_1 при сравнительно небольших числах пазов и полюсов,

характерных для большинства асинхронных двигателей, приводят к некоторой асимметрии МДС. Поэтому выбор окончательного числа пазов следует проводить с четкой увязкой и контролем получаемого при этом числа q. Окончательное значение $t_{z1} = \pi D/(2pmq)$ не должно выходить за указанные выше пределы более чем на 10 % и в любом случае для двигателей с $h \geq 56$ мм не должно быть менее 6—7 мм.

При определении числа эффективных проводников в пазу $u_п$ руководствуются следующим: $u_п$ должно быть целым, а в двухслойной обмотке желательно, чтобы оно было кратным двум. Применение двухслойных обмоток с нечетным $u_п$ допускается лишь в исключительных случаях, так как это приводит к необходимости выполнять разновитковые катушки, что усложняет технологию изготовления и укладки обмотки. Поэтому полученные в расчете числа $u_п$ приходится округлять до ближайшего целого или четного числа. Чтобы это округление не было слишком грубым (что особенно заметно при малых $u_п$), вначале определяют предварительное число эффективных проводников в пазу $u'_п$ при условии, что параллельные ветви в обмотке отсутствуют ($a = 1$):

$$u'_n = \pi DA / I_{1ном} Z_1, \tag{9.17}$$

где A — принятое ранее значение линейной нагрузки, A/м: $I_{1ном}$ — номинальный ток обмотки статора, А:

$$I_{1ном} = P_2 / (mU_{1ном}\, \eta\, cos\varphi) \tag{9.18}$$

(η и $\cos\varphi$ заданы или выбраны в начале расчета).

Полученное по (9.17) значение $u'_п$ не округляют до целого, а находят такое число параллельных ветвей обмотки a, при котором число эффективных проводников в пазу либо будет полностью удовлетворять отмеченным условиям, либо потребует лишь незначительного изменения:

$$u_п = a\, u'_п. \tag{9.19}$$

Число a при этом, естественно, может быть взято только из ряда возможных чисел параллельных ветвей для обмотки данного типа и заданного числа полюсов (см. гл. 3).

Полученное из (9.19) число округляют до ближайшего целого или четного в зависимости от типа обмотки.

Принятое на данном этапе расчета число параллельных ветвей a в дальнейшем при выборе размеров и числа элементарных проводников может быть изменено. В этом случае пропорционально изменяется также и $u_п$

Окончательное число витков в фазе обмотки

$$w_1 \quad U_п Z_1 / (2am). \tag{9.20}$$

Окончательное значение линейной нагрузки, А/м,

$$A \quad 2I_{1ном}\, w_1 m/(\pi D). \qquad (9.21)$$

Оно, как правило, незначительно отличается от принятого ранее, так как его изменение определяется только отношением рассчитанного по (9.19) и принятого числа эффективных проводников в пазу $u_п$ Полученное значение A нужно сопоставить с рекомендуемым (.м.рис. 9.22— 9.24).

Схему обмотки статора выбирают в зависимости от мощности машины, ориентируясь на конструкцию и предполагаемую технологию укладки обмотки в пазы. Машины мощностью до 12.. .15 кВт в большинстве случаев имеют однослойную концентрическую обмотку из круглого провода. В машинах большей мощности обмотки выполняют двухслойными, а при механизированной укладке применяют одно-двухслойные или двухслойные концентрические обмотки, которые могут быть уложены в пазы без подъема шага. Все обмотки из прямоугольного провода выполняют только двухслойными, равнокатушечными.

Обмоточный коэффициент $k_{об} = k_p\, k_у$ рассчитывают в зависимости от числа пазов на полюс и фазу q и укорочения шага обмотки $\beta = y_{расч} / \tau$, где $y_{расч}$ — расчетный шаг, определяемый по формулам, приведенным в § 3.6, в зависимости от типа обмотки.

В двухслойных обмотках асинхронных двигателей шаг выполняют в большинстве случаев с укорочением, близким к $\beta = 0{,}8$.

После расчета $k_{об1}$ уточняют значение потока Ф, Вб:

$$\Phi = \frac{k_E U_1}{4 k_B w_1 k_{об1} f_1} \qquad (9.22)$$

и определяют индукцию в воздушном зазоре B_δ, Тл:

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau\, l_\delta} = \frac{p\Phi}{D l_\delta}. \qquad (9.23)$$

Если полученное значение B_δ выходит за пределы рекомендуемой области (см. рис. 9.22 — 9.24) более чем на ± 5 %, следует принять другое значение числа $u_п$ и повторить расчет.

Если линейная нагрузка и индукция в воздушном зазоре при принятом числе пазов и эффективных проводников в пазу находятся в рекомендуемых пределах, переходят к расчету сечения эффективного проводника и обмоточного провода.

Сечение эффективных проводников, м^2, определяют, исходя из тока одной параллельной ветви и допустимой плотности тока в обмотке:

$$q_{эф1} \quad I_{1ном}/(aJ_1)\,. \qquad (9.24)$$

С точки зрения повышения использования активных материалов плотность тока J_1 должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастают потери

в меди обмотки. Увеличение потерь сказывается, во-первых, на повышении температуры обмотки и, во-вторых, на КПД двигателя. В асинхронных двигателях общего назначения при принятой в них системе косвенного охлаждения влияние плотности тока на нагрев обмотки более существенно, чем на КПД. На этом основании определены качественные зависимости допустимой плотности тока в обмотках различных машин. Она повышается с уменьшением габаритов машины, с увеличением допустимого нагрева обмотки при переходе на другой, более высокий класс нагревостойкости изоляции и с повышением интенсивности охлаждения (например, в машинах защищенного исполнения по сравнению с закрытыми обдуваемыми двигателями).

Нагрев пазовой части обмотки зависит от произведения линейной нагрузки на плотность тока (AJ). Поэтому выбор допустимой плотности тока производят с учетом линейной нагрузки двигателя:

$$J_1 = (AJ)/A. \tag{9.25}$$

Значения (AJ) для асинхронных двигателей различных исполнения и мощности приведены на рис. 9.27.

Для всыпных обмоток могут быть использованы обмоточные провода диаметром не более 1,8 мм, однако в современных двигателях для повышения надежности обмотки и упрощения ее укладки в пазы используют провода меньшего диаметра. В обмотках, предназначенных для механизированной укладки, диаметр изолированного провода обычно берут не более 1,4 мм, а при ручной укладке (двигатели с $h > 160$ мм) — не более 1,7 мм.

Если расчетное сечение эффективного проводника в машинах со всыпной обмоткой выше значений, соответствующих указанным диаметрам, то эффективный проводник делят на несколько элементарных. Для этого по табл. П 3.1 подбираются сечение $q_{эл}$ и число элементарных проводников $n_{эл}$, составляющих один эффективный, таким образом, чтобы диаметр $d_{эл}$ элементарных проводников не выходил за указанные пределы, а их суммарная площадь сечения была близка к расчетному сечению эффективного проводника:

$$q_{эл} n_{эл} \approx q_{эф}. \tag{9.26}$$

В обмотках из круглого провода число элементарных проводников может быть взято до 8—10, но при большом $n_{эл}$ возрастают технологические трудности намотки катушек, поэтому в современных машинах стремятся уменьшить число элементарных проводников в одном эффективном до 6—8, для чего увеличивают число параллельных ветвей. В двухполюсных двигателях $n_{эл}$ увеличивают, поскольку число параллельных ветвей в них не может быть более двух.

При проектировании машин с обмоткой из прямоугольного провода сечение каждого проводника не должно быть взято более 17...20 мм^2, так

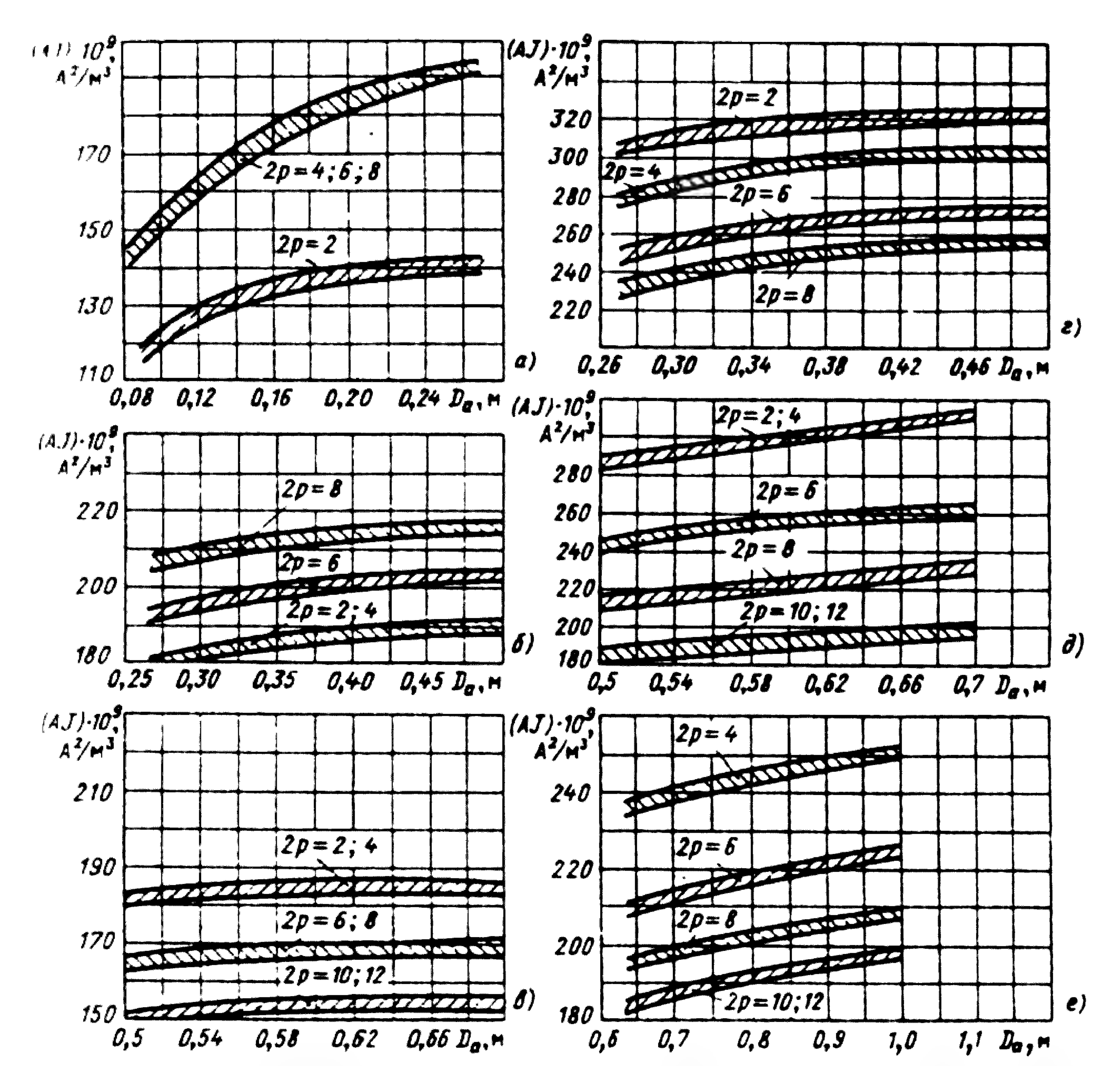


Рис. 9.27. Средние значения произведения AJ асинхронных двигателей со степенью защиты: а — IP44, h ≤132 мм; б — IP44, h = 160...250 мм; в — IP44 h=280...355 мм (при продуваемом роторе); г — IP23, h = 160...250 мм; д — IP23, h = 280...355 мм; е — IP23, при $U_{ном}$=6000 В

как в этом случае становится заметным возрастание потерь на вихревые токи.

Если расчетное значение $q_{эф}$ > 20 мм^2, то прямоугольные проводники подразделяют на элементарные так, чтобы $q_{эл} \leq 17...20$ мм^2.

В обмотках из прямоугольного провода, укладываемых в открытые пазы, $n_{эл}$ обычно не более 2. При $n_{эл} = 2$ они располагаются на одном уровне по высоте паза (см. рис. 3.7). Обмотку с четырьмя элементарными проводниками (см. рис. 3.7, б) в асинхронных двигателях применяют редко. Если обмотка выполняется из подразделенных катушек, которые укладывают в полуоткрытые пазы (см. рис. 3.6, б), то всегда образуются два элементарных проводники, так как катушки, расположенные на одной высоте в пазу, соединяются параллельно (см. § 3.2).

При прямоугольных обмоточных проводах сечение эффективного проводника не должно превышать 35...40 мм^2, поэтому при большом номинальном токе в таких машинах выполняют наибольшее возможное число параллельных ветвей.

По одной и той же площади поперечного сечения прямоугольных проводников их линейные размеры $a \times b$ могут быть различны, поэтому окончательный выбор обмоточного провода производят одновременно с расчетом размеров зубцовой зоны.

После окончательного выбора $q_{\text{эл}}$, $n_{\text{эл}}$ и a следует уточнить плотность тока в обмотке, которая может несколько измениться по сравнению с предварительно принятой при подборе сечений элементарных проводников:

$$J_1 = I_{1ном}/(a q_{\text{эл}} n_{\text{эл}}). \qquad (9.27)$$

На этом расчет обмотки статора заканчивается. Некоторая корректировка, которая может потребоваться в ходе последующего расчета, как правило, не вносит существенных изменений в полученные данные.

9.6. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗУБЦОВОЙ ЗОНЫ СТАТОРА

Размеры пазов в электрических машинах должны быть выбраны таким образом, чтобы, во-первых, площадь поперечного сечения паза соответствовала количеству и размерам размещаемых в нем проводников обмотки с учетом всей изоляции и, во-вторых, чтобы значения индукций в зубцах и ярме статора находились в определенных пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и от марки электротехнической стали сердечника. Конфигурация пазов и зубцов определяется типом обмотки, который, в свою очередь, зависит от мощности, номинального напряжения и исполнения машины. Расчет размеров зубцовой зоны проводят по допустимым индукциям в ярме и в зубцах статора (табл. 9.12).

Обмотка из прямоугольного провода укладывается в прямоугольные пазы (рис. 9.28). Боковые стенки таких пазов параллельны, поэтому зубцы статора имеют трапецеидальное сечение, и индукция в них неравномерна. Обычно задаются значениями допустимой индукции в ярме статора B_a и индукцией $.B_{z\max}$ в наиболее узком сечении зубца $b_{z\min}$ либо индукцией $B_{z^1/3}$ в сечении зубца с шириной $b_{z^1/3}$, взятом на расстоянии, равном 1/3 его высоты от наиболее узкой части зубца (см. рис. 9.28).

По выбранным значениям индукций определяются:
высота ярма статора, м,

$$h_a = \Phi/(2B_a l_{ст1} k_{ст1}); \qquad (9.28)$$

Таблица 9.12. Допустимые значения индукции на различных участках магнитной цепи, Тл.

Участок магнитной цепи	Обозначение	Исполнение IP44 при числе полюсов 2p					Исполнение IP23 при числе полюсов 2p					
		2	4	6	8	10 и 12	2	4	6	8	10	12
Ярмо статора	B_a			1,4-1,6	1,15-1,35	1,1-1,2		1,45-1,6		1,2-1,4		1,1-1,3
Зубцы статора при постоянном сечении (обмотка из круглого провода)	B_{z1}			1,6-1,9		1,6-1,8	1,8-2,05		1,7-1,95		1,6-1,9	
Зубцы статора при наиболее узком сечении:												
при полуоткрытых пазах	B_{z1max}			1,75-1,95			1,9-2,1			1,8-2		
при открытых пазах	B_{z1max}			1,6-1,9					1,7-2			
Ярмо ротора:												
короткозамкнутого	B_j	<1,45	<1,4	≤1,2	<1		<1,55	≤1,5	<1,3	<1,1		
фазного	B_j		<1,3	<1,15	<0,9			<1,4	<1,2	<1		
Зубцы ротора при постоянном сечении (трапецеидальные пазы)	B_{z2}			1,7-1,95					1,75-2			
Зубцы ротора в наиболее узком сечении:												
короткозамкнутого	B_{z2max}	1,5-1,7		1,6-1,9			1,75-2		1,7-1,95			
фазного	B_{z2max}	1,75-2,15		1,7-1,95			1,9-2,2		1,85-2,1			

Примечание. Индукции на участках магнитной цепи в большинстве асинхронных двигателей не отличаются от указанных в таблице более чем на 5 %.

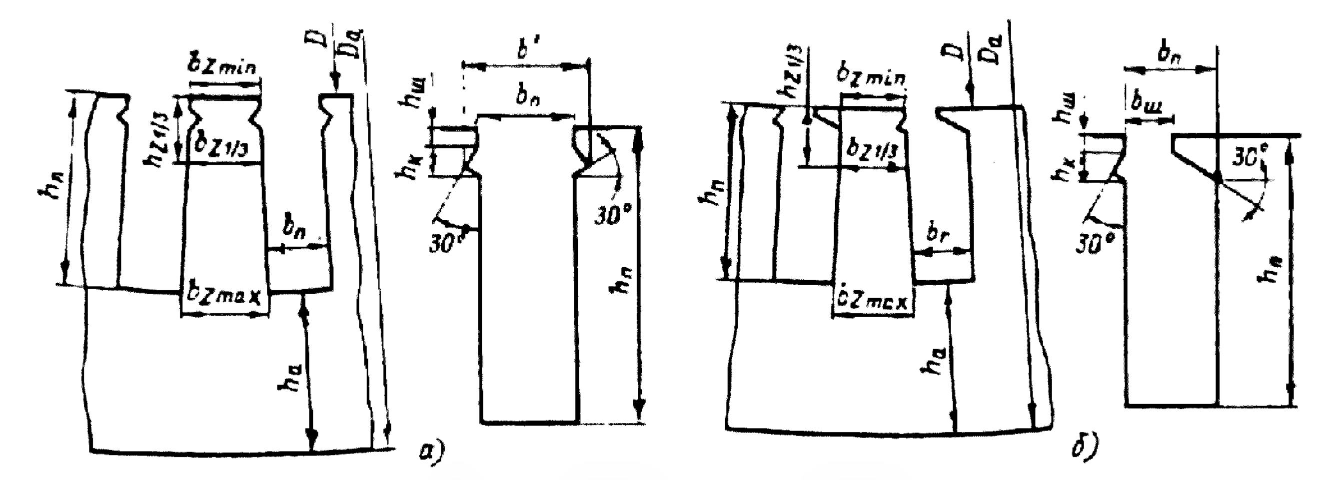


Рис. 9.28. К расчету размеров прямоугольных пазов статора:
а – открытых ; б – закрытых

минимальная ширина зубца, м,

$$b_{z1min} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{B_{Z1\max} l_{CT1} k_{C1}} \tag{9.29}$$

или ширина зубца на расстоянии 1/3 его высоты от наиболее узкой части

$$b_{z1/3} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{B_{Z1\,3} l_{CT1} k_{C1}} \tag{9.30}$$

Значение коэффициента заполнения сердечника сталью следует брать из табл. 9.13.

Таблица 9.13. Способы изолирования листов электротехнической стали и коэффициенты заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора с номинальным напряжением до 660 В

Высота оси вращения	Статор		Короткозамкнутый ротор		Фазный ротор	
	Способ изолирования листов	k_c	Способ изолирования листов	k_c	Способ изолирования листов	k_c
50-250	Оксидирование	0,97	Оксидирование	0,97	–	–
280-355	Лакировка	0,95	“	0,97	Лакировка	0,95

Размеры паза вначале определяют без учета размеров и числа проводников обмотки, исходя только из допустимых значений индукций в зубцах и ярме статора:

высота паза, м,

$$h_{n1} = \frac{D_a - D}{2} - h_a ; \tag{9.31}$$

ширина паза, м,

$$b_n - t_{z1} \quad b_{z1min} \qquad (9.32)$$

или

$$b_n \quad \frac{\pi(D+2h_П/3)}{Z_1} - b_{Z1\ 3} \qquad (9.33)$$

Обычно $b_п \approx (0{,}4\ldots0{,}5)t_{z1}$

Предварительно определенная ширина паза $b_п$ используется для выбора размеров обмоточного провода. Ширина проводника b должна быть меньше ширины паза на толщину всей изоляции с учетом допусков, т. е. корпусной, витковой (если она устанавливается в данной конструкции) и проводниковой ($2b_{из}$), а также припусков на сборку сердечников ($b_п$ см. ниже) :

$$b_п - b_п - \Delta'_{из} \qquad (9.34)$$

где $\Delta'_{из}$ - толщина всей изоляции.

Все данные по толщине этих видов изоляции берутся из соответствующих таблиц в зависимости от номинального напряжения и мощности машины, конструкции и класса нагревостойкости изоляции.(см. гл. 3).

Если эффективный проводник обмотки состоит из двух элементарных проводников, то ширина каждого из них будет равна:

$$b - 0{,}5(b_п - \Delta'_{из}) \qquad (9.35)$$

Значения по (9.34) и (9.35) являются предварительными. Окончательная ширина проводника находится по таблице стандартных размеров обмоточных проводов (см. табл. П3.3). Из этой таблицы по предварительно определенной ширине проводника и по его расчетному сечению подбираются наиболее близкие к ним стандартные значения $q_{эл}$ и b и соответствующая им высота проводника a. Высота проводника при этом не должна превышать 2,5 - 3,0 мм, так как при большей высоте в проводниках, лежащих друг над другом в одном пазу, начинает проявляться эффект вытеснения тока, вызывающий неравномерное распределение плотности тока по сечению проводников и увеличивающий потери в меди обмотки. Действие этого эффекта возрастает с увеличением числа проводников по высоте паза, поэтому в многовитковых катушках высота проводников не должна превышать указанных пределов, а при малом числе витков она может быть выбрана несколько большей.

Слишком малая высота проводников (a <1 мм) вызывает значительные трудности при изготовлении катушек, так как при изгибе проводников на ребро во время намотки катушек могут произойти разрывы провода или его изоляции.

Нежелательно также применение прямоугольных проводов с близкими размерами a и b, так как в этом случае провод во время намотки катушек часто перекручивается и при рихтовке может быть повреждена изоляция на

его гранях. Обычно используют провода с отношением размеров $b : a$, близким к 2 : 1

После уточнения размеров проводников составляется подробная спецификация паза (таблица заполнения паза) с указанием размеров проводов, названий, размеров и числа слоев изоляционных материалов, различных прокладок и т. п.

Сумма размеров по высоте и ширине паза всех проводников и изоляции с учетом необходимых допусков на разбухание изоляции и на укладку обмотки определяет размеры части паза, занятой обмоткой.

В боковых стенках верхней части открытых пазов выполняют выемки для крепления пазовых клиньев (см. Рис. 2-1). Глубина выемок под клин, высота шлица $h_ш$ и высота клиновой части паза $h_к$ возрастают с увеличением мощности машины и ширины ее пазов. Обычно в асинхронных двигателях общего назначения $b' - b_п$ = 2…5 мм, $h_ш$ = 0,5…1,0 мм и $h_к$ = 3…3,5 мм в машинах средней мощности и достигает 5 мм в крупных машинах.

Полученные при расчете заполнения паза его размеры являются размерами паза “в свету”, т. е. размерами реального паза в собранном шихтованном сердечнике с учетом неизбежной при этом “гребенки”, образующейся за счет допусков при штамповке листов и шихтовке магнитопроводов.

Размеры паза “в свету” будут меньше, чем в штампе, т.е. чем размеры паза паза в каждом отдельном листе после штамповки, на величину припусков, указанных в табл. 9.14.

Таблица 9.14. Припуски по ширине и высоте паза

Высота оси вращения h, мм	Припуски, мм	
	по ширине паза $\Delta b_п$	По высоте паза $\Delta h_п$
50 – 132	0,1	0,1
160 – 250	0,2	0,2
280 – 355	0,3	0,3
400 – 500	0,4	0,4

Поэтому размеры паза в штампе следующие:

$$\left.\begin{aligned} b_П &= b_П + \Delta b_П \\ h_П &= h_П + \Delta h_П \end{aligned}\right\} \qquad (9.36)$$

где $b'_п$ и $h'_п$ – размеры паза “в свету”, полученные при расчете заполнения паза проводниками обмотки и изоляцией.

После того как размеры паза в штампе окончательно установлены, определяют расчетные размеры зубцов b_{zmin}, b_{zmax} или $b_{z1/3}$ и h_z (табл. 9.15).

Таблица 9.15. Расчетные размеры трапецеидальных зубцов статора при открытых и полуоткрытых пазах

Размер	Паз по рис. 9.28, а	Паз по рис. 9.28, б
bz_{min}	$\frac{\pi D}{Z_1}-b_П$	$\pi\frac{D+2(h_Ø+h_Ê)}{Z_1}-b_Ï$
bz_{max}	$\pi\frac{D+2h_П}{Z_1}-b_П$	$\pi\frac{D+2h_Ï}{Z_1}-b_Ï$
$Bz_{1\,3}$	$\pi\frac{D+\frac{2}{3}h_П}{Z_1}-b_П$	$\pi\frac{D+\frac{2}{3}h_П}{Z_1}-b_П$
h_z	$h_П$	$h_П$

Обмотку из подразделенных катушек в машинах общего назначения с номинальным напряжением U ≤ 660 В укладывают в полузакрытые пазы (см. рис. 9.28, б). Ширина шлица паза $b_ш$ выбирается из условия обеспечения свободной укладки полукатушек в паз, поэтому $b_ш$ = 0,5 $b_п$ + (1,0...1,5) мм. Высоту шлица и высоту клиновой части паза выполняют в пределах $h_ш$ = 0,6...0,8 мм и $h_к$ = 2,5...3,5 мм (большие значения берутся при широких пазах и большей мощности двигателей). Выбор размеров проводников, расчет заполнения паза и определение его размеров “в свету” и в штампе производят так же, как и для открытых пазов. Ширину и расчетную высоту зубцов определяют по формулам табл. 9.15.

Круглые обмоточные провода всыпной обмотки могут быть уложены в пазы произвольной конфигурации, поэтому размеры зубцовой зоны при всыпных обмотках выбирают таким образом, чтобы параллельные грани имели зубцы, а не пазы статора (рис. 9.29). Такие зубцы имеют постоянное, не изменяющееся с высотой зубца поперечное сечение, индукция в них также не изменяется, и магнитное напряжение зубцов с параллельными гранями оказывается меньше, чем магнитное напряжение трапецеидальных

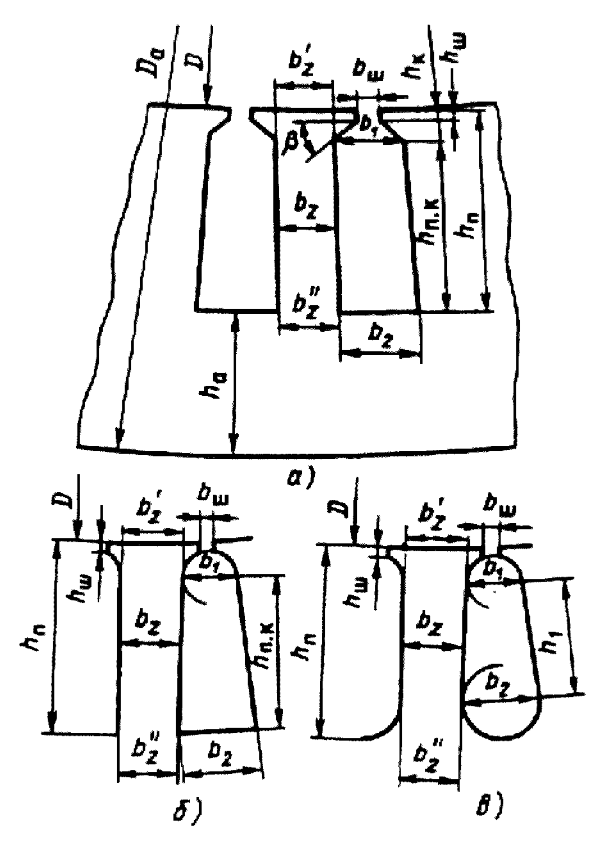


Рис. 9.29. К расчету размеров зубцовой зоны статоров с обмоткой из круглого провода: а—в — различные конфигурации пазов

зубцов, при том же среднем значении индукции в них. Это объясняется отсутствием в зубцах с параллельными гранями участков с высокой индукцией, напряженность поля в которых резко возрастает из-за нелинейности магнитной характеристики стали, увеличивая суммарное магнитное напряжение зубцов.

Обмотку из круглого провода укладывают в пазы одной из приведенных на рис. 9.29, а–в конфигураций. В большинстве современных двигателей, выпускаемых отечественной промышленностью, выполняют трапецеидальные пазы (рис. 9.29, а, б), хотя лучшее заполнение паза достигается в пазах с овальной нижней частью (рис. 9.29, в). Угол наклона грани клиновой части в трапецеидальных пазах у двигателей с h ≤ 250 мм обычно β = 45°, при большей высоте оси вращения β = 30°.

Принцип расчета размеров паза всыпной обмотки остается таким же, как и для пазов с прямоугольными проводами. Сначала проводят предварительный выбор размеров, исходя из допустимой индукции в зубцах и ярме статора,

$$b_{Z1} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{B_{Zcc} l_{CT1} k_C} \qquad (9.37)$$

и h_a по (9.28).

В дальнейшем, после расчета коэффициента заполнения паза проводниками обмотки, полученное значение b_{z1} уточняется. Требование выполнить зубцы с параллельными гранями накладывает дополнительные условия на возможные соотношения размеров паза. Это вызывает известные трудности расчета зубцовой зоны, который рекомендуется проводить в следующей последовательности (расчетные формулы приведены только для пазов, показанных на рис. 9.29, а; для других конфигураций они могут быть легко получены, исходя из условия сохранения постоянства ширины зубцов).

По допустимым индукциям в ярме и зубцах статора (см. табл. 9.12) из (9.28) и (9.37) определяют высоту ярма h_a и ширину зубца b_z статора. Далее находят размеры паза в штампе (см. рис. 9.29, а), м,

$$h_n = 0,5(D_a \quad D) \quad h_a \qquad (9.38)$$

$$b_2 = (D+2h_n)/Z_1 - b_{z1} \qquad (9.39)$$

Размер b_1 определяют в зависимости от угла β :

при β = 45°

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_Ш - b_Ш) - Z_1 b_{Z1}}{Z_1 - \pi} \qquad (9.40)$$

при β = 30°

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_Ш - b_Ш/\sqrt{3}) - Z_1 b_{Z1}}{Z_1 - \pi/\sqrt{3}} \qquad (9.41)$$

Полученные размеры округляют до десятых долей миллиметра.

Высота шлица паза $h_ш$ обычно лежит в пределах от 0,5 до 1 мм в зависимости от мощности двигателя. Следует иметь в виду, что $h_ш$ должна быть достаточной для обеспечения механической прочности кромок зубцов, удерживающих в уплотненном состоянии проводники паза после заклиновки пазов. Однако увеличение $h_ш$ приводит к возрастанию потока рассеяния паза, что в большинстве случаев нежелательно. Обычно в двигателях с h ≤ 132 мм принимают $h_ш = 0{,}5$ мм, в двигателях с h ≥ 160 мм увеличивают до $h_ш = 1$ мм.

Ширину шлица паза в статорах, рассчитанных на укладку обмотки вручную, принимают равной $b_ш = d_{из} + (1{,}5...2)$ мм, где $d_{из}$ - диаметр изолированного обмоточного провода, мм. Размер $b_ш$ должен обеспечить возможность свободного пропуска проводников обмотки через шлиц с учетом толщины изоляционных технологических прокладок, устанавливаемых при укладке обмотки для предохранения изоляции проводников от повреждений об острые кромки шлица.

В машинах с однослойной, одно-двухслойной или с двухслойной концентрической обмоткой, в которых укладка обмотки механизирована, ширину шлица паза выполняют несколько большей. При совмещенном методе укладки ширина шлица паза, мм,

$$b_ш \quad d_{из} + (1{,}8...2{,}3).$$

При раздельном методе $b_ш$ еще более увеличивают в зависимости от размеров штыревой оправки, применяемой для втягивания катушек обмотки в пазы, диаметра провода и коэффициента заполнения паза.

Проектируя серии асинхронных двигателей, размер $b_ш$ нормализуют. В сериях 4А и АИ он выполняется равным от 1,8 мм в машинах малой мощности и до 4 мм в более крупных. Средние значения $b_ш$ для двигателей при различных h и 2p приведены в табл. 9.16.

Таблица 9.16. Средние значения ширины шлица полузакрытых пазов статоров асинхронных двигателей с обмоткой из круглого провода $b_ш$, мм

А, мм	Число полюсов двигателя *2p*				
	2	4	6-8	10	12
50-63	1,8	1,8	1,8	-	-
71	2	2	2	-	-
80-90	3	3	2,7	-	-
100,112	3,5	3,5	3	-	-
132	4	3,5	3,5	-	-
160-250	4	3,7	3,7	-	-
280-315	-	-	-	4	4

В клиновой части паза располагают пазовые крышки (в машинах с h ≤ 160 мм), а в более крупных машинах — пазовые клинья. Поэтому при расчете площади поперечного сечения паза, используемой для размещения обмотки, эти участки не учитывают. Размеры паза, при которых обеспечивается параллельность боковых граней зубцов, могут быть определены также графоаналитическим методом. Его удобно применять, если конфигурация пазов отличается от рассмотренной трапецеидальной, для которой приведены аналитические выражения (9.38)—(9.41). Графоаналитический расчет выполняют в следующей последовательности.

Вначале строят равнобедренную трапецию (рис. 9.30, а), верхнее основание которой равно в выбранном масштабе пазовому делению t_{z1}, нижнее основание $t'_{z1} = t_{z1} D_a / D$, а высота $h = (D_a - D)/ 2$. Такая трапеция представляет собой как бы вырезанный из листа статора сектор пазового деления, в котором должны разместиться паз (ось паза совпадает с осью трапеции), прилегающие к нему с обеих сторон половины сечений зубцов и участок ярма статора. По допустимым индукциям B_{z1} и B_a определяют ширину зубца по (9.37) и высоту ярма по (9.28). На построенной трапеции линиями, параллельными ее боковым граням, отсекают участки шириной $0{,}5b_{z1}$ и линией, параллельной ее основаниям, — участок шириной h_a (рис. 9.30, б). В оставшуюся часть трапеции (рис. 9.30, б — не заштрихована) вписывают контур паза выбранной конфигурации (рис. 9.30, в). Его основные размеры b_1, b_2 и $h_п$ обеспечивают параллельность боковых граней зубцов при наименьших возможных, с точки зрения допустимой индукции, размерах зубцов и ярма.

Для достижения достаточной точности построение должно быть выполнено в крупном масштабе, при котором возможна достоверность определения размеров паза с точностью до 0,1 мм, например 10:1 или 5:1.

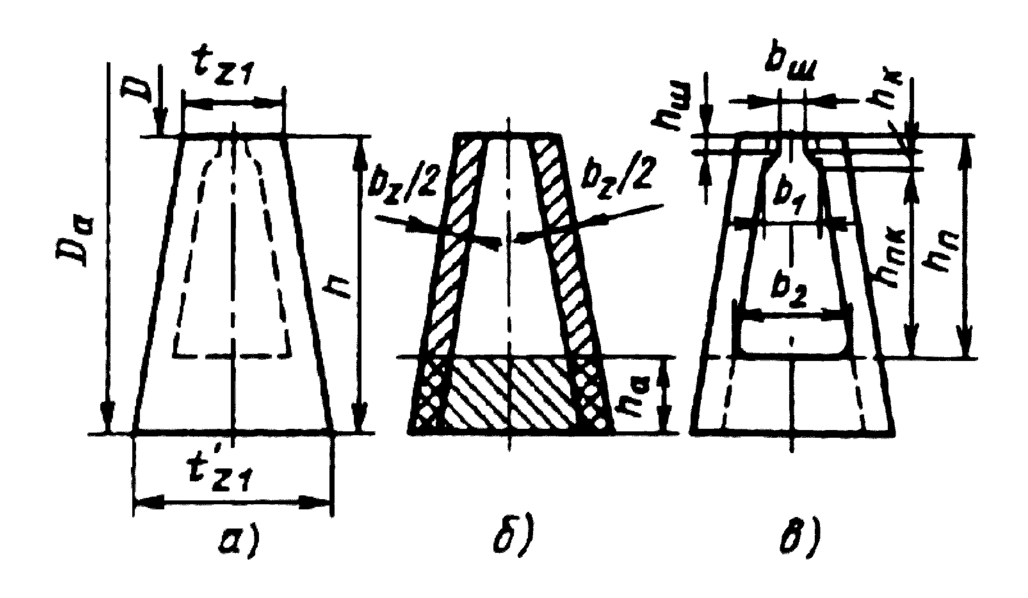


Рис. 9.30. К графоаналитическому методу определения размеров паза статора

Для расчета коэффициента заполнения паза необходимо определить площадь паза “в свету” и учесть площадь поперечного сечения паза, занимаемую корпусной изоляцией $S_{из}$ и прокладками в пазу $S_{пр}$. Размеры паза “в свету” определяют с учетом припусков на шихтовку сердечников $\Delta b_п$ и $\Delta h_п$:

$$\left.\begin{aligned} b_1' &= b_1 - \Delta b_П \\ b_2' &= b_2 - \Delta b_П \\ h_П' &= h_П - \Delta h_П \end{aligned}\right\} \qquad (9.42)$$

где $\Delta b_п$ и $\Delta h_п$ — см. табл. 9.14.

Площадь поперечного сечения трапецеидального паза, в которой размещаются обмотка, корпусная изоляция и прокладки, м^2,

$$S_П' = \frac{b_1' + b_2'}{2} h_{П.К}' \qquad (9.43)$$

где

$$h_{п.к}' = h_п' - (h_ш + h_к) \qquad (9.44)$$

высота клиновой части паза $h_к = (b_1 - b_ш) \operatorname{tg} \beta / 2$, т. е.

$$\left.\begin{aligned} &h_К = (b_1 - b_Ш)/2 ... при..\beta = 45^0 \\ &и \\ &h_К = (b_1 - b_Ш)/2\sqrt{3} ... при..\beta = 30^0 \end{aligned}\right\} \qquad (9.45)$$

Площадь, занимаемая корпусной изоляцией в пазу, м2,

$$S_{из} = b_{из}(2h_п + b_1 + b_2), \qquad (9.46)$$

где $b_{из}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу, м (см. гл. 3).

Площадь, занимаемая прокладками в пазу (на дне паза, под клином и между слоями обмотки в двухслойной обмотке), м^2,

для двигателей с h = 180... 250 мм

$$S_{пр} = (0{,}9\,b_1 + 0{,}4\,b_2)10^{-3};$$

(9.47)

для двигателей с $h \geq 280$ мм

$$S_{пр} = 0{,}6\,(b_1 + b_2)\,10^{-3}$$

При отсутствии прокладок в пазу $S_{пр} = 0$.

Площадь поперечного сечения паза, остающаяся свободной для размещения проводников обмотки,

$$S_П' = \frac{b_1' + b_2'}{2} h_{П.К}' - (S_{ИЗ} + S_{ПР}). \qquad (9.48)$$

Контролем правильности размещения обмотки в пазах является значение коэффициента заполнения паза:

$$k_з = (d^2_{из} u_п n_{эл}) / S'_п$$

(см. § 3.4), который должен находиться в пределах $k_з$ = 0,69. ..0, 71 для двигателей с 2р = 2 и $k_з$ = 0,72. ..0,74 для двигателей с 2р ≥ 4.

Если полученное значение ниже указанных пределов, то площадь паза следует уменьшить за счет увеличения h_a или b_Z, или обоих размеров одновременно в зависимости от принятого при их расчете значения индукции. Индукция в зубцах и ярме статора при этом уменьшится. Уменьшение индукции ниже пределов, указанных в табл. 9.12, показывает, что главные размеры двигателя завышены и активная сталь недоиспользована. В этом случае следует уменьшить длину сердечника или перейти на ближайшую меньшую высоту оси вращения.

Часто расчет показывает, что значение $k_з$ оказывается выше указанных пределов. Это недопустимо, так как при чрезмерно высоких $k_з$ проводники обмотки во время укладки приходится очень сильно уплотнять в пазах. Их изоляция может быть повреждена или, по меньшей мере, ослаблена, что вызовет резкое уменьшение надежности обмотки. Для уменьшения $k_з$ надо, взяв предельно допустимые значения B_Z и B_a (см. табл. 9.12), пересчитать размеры b_Z и h_a. К уменьшению $k_з$ приводит также уменьшение числа элементарных проводников $n_{эл}$, которое возможно при одновременном пропорциональном увеличении площади поперечного сечения $q_{эл}$ или уменьшении числа параллельных ветвей обмотки с тем, чтобы плотность тока осталась неизменной. Если и при этом значение $k_з$ остается выше допустимого, следует сделать вывод, что принятые главные размеры двигателя занижены. Необходимо просчитать другой вариант, увеличив l или перейдя на большую высоту оси вращения.

Таблица 9. 17. Расчетные размеры зубцов статоров при трапецеидальных или грушевидных пазах в машинах с обмоткой из круглого провода

Размер	Рис. 9.29, а	Рис. 9.29, б	Рис. 9.29, в
b_Z	$\pi \frac{D+2(h_Ш+h_К)}{Z} - b_1$	$\pi \frac{D+2h_Ш+b_1}{Z} - b_1$	$\pi \frac{D+2h_Ш+b_1}{Z} - b_1$
b_Z	$\pi \frac{D+2h_П}{Z} - b_2$	$\pi \frac{D+2h_П}{Z} - b_2$	$\pi \frac{D+2h_П-b_2}{Z} - b_2$
h_Z	$h_П$	$h_П$	$h_П$ - 0,1 b_2

После уточнения размеров паза ширину зубца и расчетную высоту паза определяют по формулам табл. 9.17. Обычно при всыпной обмотке $b_Z = b'_Z = b''_Z$. В некоторых случаях возможно некоторое расхождение значений b'_Z и b''_Z, поэтому рекомендуется рассчитать оба

значения b'_Z и b''_Z и при небольшом расхождении результатов взять среднюю расчетную ширину зубца: $b_Z = (b'_Z + b''_Z)/ 2$. При больших расхождениях следует изменить соотношения размеров пазов.

9.7. ВЫБОР ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА

Правильный выбор воздушного зазора во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть МДС магнитной цепи всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответственному уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающие тока двигателя, благодаря чему возрастает его cosφ и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но чрезмерное уменьшение приводит к возрастанию амплитуды пульсаций индукции в воздушном зазоре и, как следствие этого, к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень малыми и зазорами не улучшается, а часто даже становится меньше.

В современных асинхронных двигателях зазор выбирают, исходя из минимума суммарных потерь. Так как при увеличении зазора потери в меди возрастают, а поверхностные и пульсационные уменьшаются, то существует оптимальное соотношение между параметрами, при котором сумма потерь будет наименьшей. Такие расчеты проводят на ЭВМ по оптимизационным программам. При учебном проектировании воздушный зазор следует выбирать, руководствуясь данными выпускаемых двигателей (рис. 9.31) либо следующими приближенными формулами.

Для двигателей мощностью менее 20 кВт воздушный зазор, м, равен при 2р - 2

$$\delta \approx (0{,}3 + 1{,}5D)\, 10^{-3}; \qquad (9.49)$$

при 2р > 4

$$\delta \approx (0{,}25 + D)\, 10^{-3}. \qquad (9.50)$$

Для двигателей средней и большой мощности

$$\delta \approx \frac{D}{1{,}2}\left(1+\frac{9}{2p}\right)10^{3} \qquad (9.51)$$

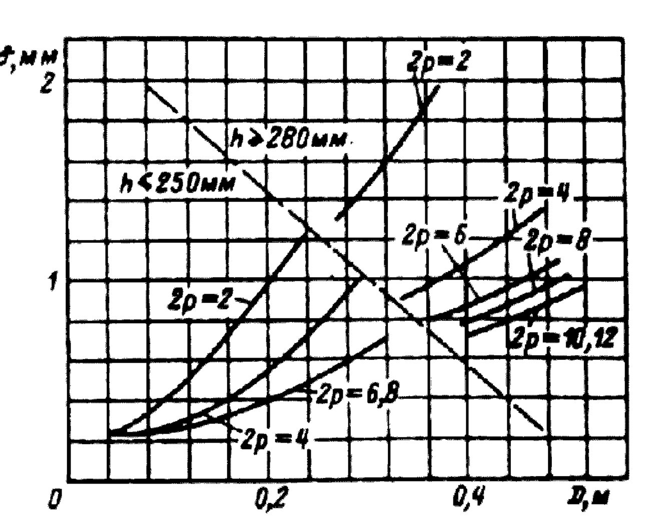


Рис. 9.31. К выбору воздушного зазора асинхронных двигателей

Поверхностные и пульсационные потери в двигателях зависят не только от амплитуд, но и от частоты пульсаций индукции в воздушном зазоре. В быстроходных двигателях частота пульса-

ций больше, чем в тихоходных, так как она пропорциональна частоте вращения. Для уменьшения этого вида потерь δ в быстроходных двигателях выполняют большим, что уменьшает амплитуду пульсаций.

В статорах высоковольтных машин применяют только открытые пазы, и при малых зазорах это может привести к большим пульсациям индукции, поэтому воздушный зазор в них выполняют большим, обычно равным 1,5...2 мм.

Воздушный зазор, полученный по эмпирическим формулам или из графиков, следует округлять до 0,05 мм при $\delta < 0,5$ мм и до 0,1 мм при $\delta > 0,5$ мм. Например, зазор выбирают равным 0,35; 0,4; 0,45; 0,5; 0,6 мм и т. д.

Выбранный по приведенным рекомендациям воздушный зазор обычно превышает минимально допустимый по механическим условиям. Однако все же необходимо провести механический расчет вала проектируемого двигателя. Прогиб вала не должен быть больше 10 % воздушного зазора.

9.8. РАСЧЕТ РОТОРА

9.8.1. *Фазные роторы*

Для нормальной работы асинхронного двигателя необходимо, чтобы фазная обмотка ротора имела столько же фаз и столько же полюсов, сколько их имеет обмотка статора, т. е. $m_2 = m_1$ и $p_2 = p_1$.

Число пазов ротора Z_2 должно отличаться от числа пазов статора. При расчете задаются обычно числом пазов на полюс и фазу ротора $q_2 = q_1 \pm К$, тогда $Z_2 = Z_1 q_2/q_1$. В большинстве случаев К = 1 или К = 1/2. При характерном для обмоток статора асинхронных двигателей целом q_1 обмотка ротора имеет целое или дробное число q_2 со знаменателем дробности, равным 2. Обмотки ротора со знаменателем дробности, большим двух, встречаются редко (в основном в крупных многополюсных машинах).

Число витков в фазе обмотки ротора выбирают исходя из допустимого напряжения на контактных кольцах при пуске двигателя. ЭДС фазы обмотки ротора E_2 определяется магнитным потоком, который при постоянном уровне индукции в воздушном зазоре растет с увеличением габаритов двигателя. Поэтому в крупных машинах напряжение на контактных кольцах может достигнуть слишком большого значения и привести к перекрытию или пробою изоляции колец.

Чтобы E_2 не достигала опасного значения, обмотку роторов крупных машин выполняют с малым числом витков в фазе. В современных асинхронных двигателях наиболее распространенной обмоткой такого типа является двухслойная стержневая обмотка, при которой в пазу размещаются только два

эффективных проводника. Для уменьшения количества межгрупповых соединений она выполняется волновой.

В отдельных машинах можно встретить и однослойную стержневую обмотку ротора. Она применяется как исключение в крупных машинах специального исполнения, так как требует сложной в технологическом отношении конструкции лобовых частей стержней.

В небольших по габаритам машинах опасности чрезмерного увеличения E_2 нет, так как поток в них невелик, и число витков в фазе обмотки ротора увеличивают, чтобы снизить ток через щеточные контакты, что особенно важно в двигателях с постоянно прилегающими к контактным кольцам щетками. Такие обмотки выполняют из многовитковых катушек. Описание конструкции и схем обмоток фазных роторов дано в гл. 3.

Расчет обмотки фазного ротора проводят в следующей последовательности.

Для определения числа витков в фазе роторов с катушечной обмоткой предварительно задаются ЭДС фазы E_2, при которой напряжение на контактных кольцах ($U_{к.к}$) в момент пуска двигателя приблизительно равно линейному номинальному напряжению двигателя. Обмотки роторов в большинстве случаев соединяют в звезду

при этом $U_{к.к} = \sqrt{3}E_2 = 150...250$ В. Если обмотку ротора соединяют в треугольник, то $U_{к.к} = E_2$.

Число витков в фазе

$$w_2 = \frac{E_2}{4 k_b k_{об2} f_2 Ф} = \frac{E_2}{k_E k_{1ном}} \frac{f_1}{f_2} w_1 \frac{k_{об1}}{k_{об2}}$$

Так как E_2 выбрана приближенно и может быть несколько изменена, то, принимая отношение обмоточных коэффициентов $k_{об1}/k_{об2} = 1$ и $k_E = 1$ и учитывая, что при $s = 1$ отношение $f_1 / f_2 = 1$, получаем

$$w_2 = \frac{E_2}{U_{1ном}} w_1 \qquad (9.52)$$

Число эффективных проводников в пазу

$$U_{п2} = \frac{2 w_2 E_2}{Z_2} = \frac{w_2}{p_2 q_2} \qquad (9.53)$$

должно быть целым и при двухслойной обмотке четным, поэтому полученное значение округляют, после чего уточняют число витков в

фазе:

$$w_2 \quad u_п p_2 q_2. \qquad (9.54)$$

В роторах с двухслойной стержневой обмоткой $u_{п2}$ всегда равно двум, поэтому w_2 определяют без предварительного выбора E_2:

$$w_2 - 2p_2q_2 - Z_2/m_2. \tag{9.55}$$

После расчета w_2 необходимо проверить напряжение на контактных кольцах ротора:

$$U_{к.к.} \quad \sqrt{3}\, U_{1ном} \frac{w_2}{w_1} \tag{9.56}$$

В двигателях со стержневой обмоткой ротора $U_{к.к}$ обычно не превышает 800... 1000 В, но при расчете двигателей мощностью 1000 кВт и более могут быть получены значения $U_{к.к}$ более 1500... 2000 В. Для снижения $U_{к.к}$ в обмотке ротора иногда выполняют две параллельные ветви. При этом необходимо помнить, что стержневая волновая обмотка с a = 2 может быть выполнена симметричной только при целом числе q_2.

Предварительное значение тока в обмотке фазного ротора, А,

$$I_2 \quad k_i I_1 v_i, \tag{9.57}$$

где k_i — коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания на отношение I_1 / I_2. Его приближенное значение может быть рассчитано в зависимости от номинального cosφ, которым задавались в начале расчета:

$$k_i \quad 0{,}2 + 0{,}8\, cos\varphi, \tag{9.58}$$

v_i — коэффициент приведения токов, для двигателей с фазными роторами

$$v_i = \frac{m_1 w_1 k_{об1}}{m_2 w_2 k_{об2}}. \tag{9.59}$$

Сечение эффективных проводников обмотки ротора, м^2,

$$q_{эф2} \quad I_2 / J_2, \tag{9.60}$$

и при стержневой обмотке $q_c = q_{эф2}$. Здесь J_2 — допустимая плотность тока, А/м^2; в роторах с катушечной обмоткой при классах нагревостойкости изоляции В и F $J_2 = (5...6{,}5) \cdot 10^6$ А/м , а в более мощных двигателях со стержневой обмоткой $J_2 = (4{,}5...5{,}5) \cdot 10^6$ А/м^2.

Эффективные проводники независимо от их размеров на элементарные не подразделяют, так как эффект вытеснения тока в обмотке роторов при номинальных режимах асинхронных двигателей из-за малой частоты ($f_2 = sf_1$) не проявляется.

Окончательные размеры проводников обмотки ротора определяют по таблицам приложения 3 одновременно с расчетом размеров пазов.

В фазных роторах с катушечной обмоткой выполняют прямоугольные открытые пазы, при стержневой обмотке – прямоугольные полузакрытые пазы с узким шлицем (рис. 9.32).

Ширину паза выбирают исходя из соотношения (0,4...0,45)t_{Z2}. Примеры вычисления изоляции обмоток фазных роторов приведены в табл. 3.10 и 3.11.

При расчете заполнения паза проводниками с изоляцией следует учитывать припуск на сборку магнитопровода (см. табл. 9.14). Высоту клиновой части паза при расчете расположения проводников не учитывают. В двигателях с h = 280...355 мм выполняют $h_к$ = 2,5 мм и $h_к$ = 3,5 мм при h = 400 мм. Ширину шлица обычно принимают равной $b_ш$ = 1,5 мм, а высоту $h_ш$ = 1,0 мм.

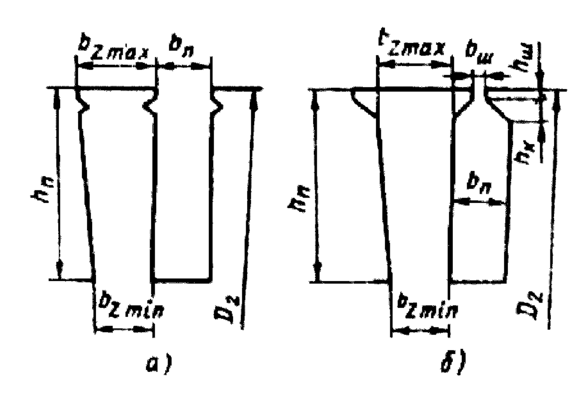


Рис. 9.32. Пазы фазного ротора асинхронного двигателя:
а — открытые (катушечная обмотка);
б — полузакрытые (стержневая обмотка)

После предварительных расчетов необходимо уточнить размер зубца ротора в наиболее узком сечении $b_{Z2\min}$ и проверить соответствие индукции $B_{Z2\max}$ ее допустимому значению для данного исполнения двигателя по табл. 9.12:

$$b_{z2min} = \frac{\pi(D_2 - 2h_{п2})}{Z_2} - b_{п2}; \qquad (9.61)$$

$$B_{z2max} = \frac{B_\delta t_{Z2} l_\delta}{b_{Z2\min} l_{CT2} k_k} \qquad (9.62)$$

Наибольшая ширина зубца ротора с открытыми пазами (рис. 9.32, а)

$$b_{z2max} = \frac{\pi D_2}{Z_2} - b_{п2}; \qquad (9.63)$$

Наибольшая ширина зубца ротора с полузакрытыми пазами (рис. 9.32, 6)

$$b_{z2max} = \pi\frac{D_2 - 2(h_ш + h_к)}{Z_2} - b_{П2} \qquad (9.64)$$

Расчетная высота зубцов при пазах обеих конфигураций принимается равной высоте паза.

9.8.2. *Короткозамкнутые роторы*

Короткозамкнутые обмотки роторов асинхронных двигателей делятся по конструкции и технологии изготовления на два типа: сварные и литые.

В сварных конструкциях (рис. 9.33 и 9.34) стержни обмотки устанавливают в пазы, после чего с торцов ротора их замыкают, приваривая или припаивая замыкающие кольца. При литых конструкциях

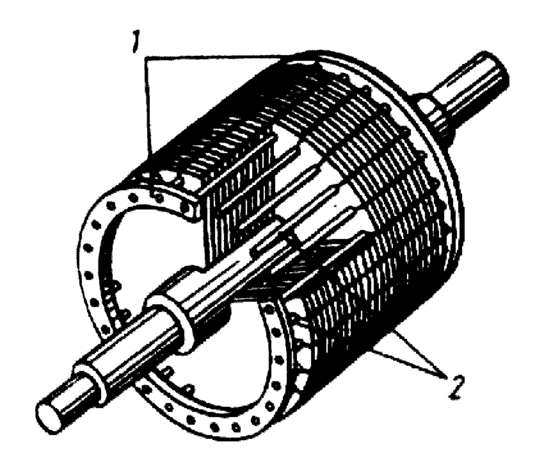


Рис. 9.33. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя со сварной обмоткой: 1 — замыкающие кольца; 2 — стержни обмотки

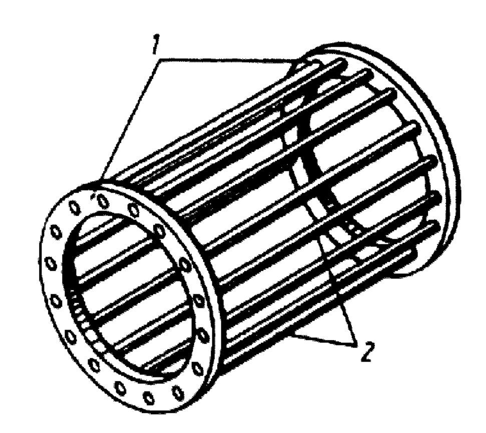


Рис. 9.34. Короткозамкнутая обмотка асинхронного двигателя: 1 — замыкающие кольца; 2 — стержни обмотки

одновременно заливают как одно целое и стержни, и замыкающие кольца. На замыкающих кольцах отливают также вентиляционные лопатки, выполняющие роль вентилятора при работе машины (см. рис. 3.10).

Короткозамкнутые обмотки роторов, в отличие от всех других существующих обмоток, не имеют определенного числа фаз и числа полюсов. Один и тот же ротор может работать в машинах, статоры которых выполнены на различные числа полюсов. Это, в частности, определило возможность использования короткозамкнутых роторов в двигателях с регулированием частоты вращения путем переключения числа полюсов обмотки статора.

Обычно принято считать, что каждый стержень обмотки образует одну фазу короткозамкнутой обмотки. Тогда число ее фаз равно числу пазов ($m_2 = Z_2$) и обмотка каждой из фаз имеет 1/2 витка, т. е. $w_2 = 1/2$, так как при $m_2 = Z_2$ к каждой фазе относится один стержень с двумя участками замыкающих колец, расположенных с разных торцов ротора (рис. 9.35). Обмоточный коэффициент такой обмотки равен единице, а условное число пазов на полюс и фазу

$$q_2 = \frac{Z_2}{2p_2 m_2} = \frac{1}{2p_2}. \qquad (9.65)$$

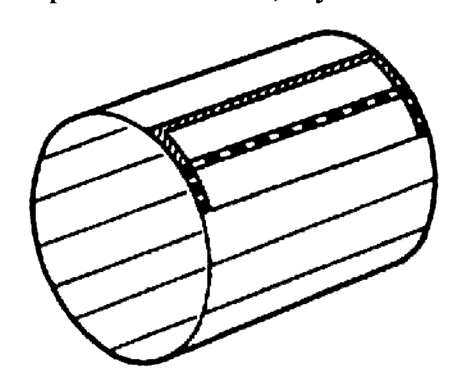


Рис. 9.35. Фазы обмотки короткозамкнутого ротора

При проектировании зубцовой зоны короткозамкнутых роторов особое внимание следует уделять выбору числа пазов ротора. Это объясняется тем, что в поле воздушного зазора машины кроме основной присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, каждая из которых наводит ЭДС в обмотке ротора,

поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав.

В результате взаимодействия токов и полей высших гармоник возникают электромагнитные моменты, которые при неблагоприятном соотношении Z_1 и Z_2 могут существенно ухудшать механическую характеристику двигателя, так как момент на валу машины является суммой моментов, обусловленных всеми взаимодействующими гармониками. В зависимости от соотношения Z_1 и Z_2 в той или иной степени проявляются синхронные или асинхронные моменты от высших гармоник.

Их влияние на момент от первой гармонической приводит к появлению пиков и провалов в результирующей кривой момента [6]. В поле зазора присутствуют также высшие гармоники, порядок которых определенным образом связан с числами пазов и полюсов машины. Это так называемые зубцовые гармоники, которые вызывают шум и вибрацию при работе двигателя при номинальном режиме. Влияние зубцовых гармоник особенно заметно при малых воздушных зазорах, характерных для асинхронных двигателей небольшой мощности.

Исследования, проведенные для изучения влияния соотношений чисел зубцов на статоре и роторе на кривую момента, а также на шумы и вибрации, позволили определить наилучшие сочетания Z_1 и Z_2 для короткозамкнутых двигателей с различными числами 2р. Рекомендации по выбору Z_2 при известных Z_1 и 2р сведены в табл. 9.18, в которой предлагается несколько возможных вариантов чисел пазов ротора при данных Z и 2р. В двигателях малой мощности
обычно выполняют $Z_2 < Z_1$. Это объясняется рядом причин технологического характера, а также тем, что с увеличением Z_2 ток в стержнях ротора уменьшается, и в двигателях небольшой мощности их сечения становятся очень малыми. В более крупных двигателях иногда выполняют $Z_2 > Z_1$, с тем чтобы ограничить чрезмерно большой ток в стержнях ротора и увеличить равномерность распределения проводников обмотки по длине расточки.

Таблица 9.18. **Рекомендуемые числа пазов роторов асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором**

2р	Число пазов статора	Число пазов ротора	
		без скоса пазов	со скосом пазов
2	12	9*, 15*	—
	18	11*, 12*. 15*, 21*, 22	14*, (18), 19*, 22*, 26, 28*, (30), 31,33, 34, 35
	24	15* (16)*, 17*, 19, 32	18,20,26,31,33,34,35
	30	22,38	(18), 20, 21,23, 24, 37, 39, 40 25, 27, 29, 43,
	36	26, 28, 44, 46	25,27,29,43,45, 47
	42	32, 33, 34, 50, 52	—
	48	38, 40, 56, 58	37.39.41.55.57.59

Продолжение табл. 9.18

2p	Число пазов статора	Число пазов ротора	
		без скоса пазов	со скосом пазов
4	12	9*	15*
	18	10*. 14*	18*, 22*
	24	15*, 16*, 17, (32)	16, 18, (20), 30, 33, 34, 35, 36
	36	26, 44, 46	(24), 27, 28, 30, (32), 34, 45, 48
	42	(34), (50), 52, 54	(33), 34, (38), (51), 53
	48	34, 38, 56, 58, 62, 64	(36), (38), (39), 40, (44), 57, 59
	60	50, 52, 68, 70, 74	48,49,51,56,64,69,71
	72	62. 64. 80. 82. 86	61.63.68.76.81.83
6	36	26, 46, (48)	28*, 33, 47, 49, 50
	54	44, 50, 64, 66, 68	42,43,51,65,67
	72	56, 58, 62, 82, 84, 86, 88	57,59,60,61,83,85,87,90
	90	74, 76, 78, 80, 100,102, 104	75,77,79,101,103,105
8	48	(34), 36, 44, 62, 64	35,44,61,63,65
	72	56, 58, 86, 88, 90	56, 57, 59, 85, 87, 89
	84	66, (68), 70, 98, 100, 102, 104	(68), (69), (71), (97), (99), (101)
	96	78.82.110.112. 114	79.80.81.83.109.111.113
10	60	44, 46, 74, 76	57, 69, 77, 78, 79
	90	68, 72, 74, 76,104, 106, 108, 110, 112,114	70,71,73,87,93,107,109
		86, 88, 92, 94, 96, 98, 102, 104, 106,	99,101,103,117,123,137,139
	120	134, 136, 138, 140, 142, 146	
12	72	56, 64, 80, 88	69,75,80,89,91,92
	90	68,70.74,88,98,106, 108,110	(71), (73), 86, 87, 93, 94, (107), (109)
	108	86, 88, 92, 100, 116, 124, 128, 130, 132	84,89,91,104,105,111,112,125,127
	144	124, 128, 136, 152, 160, 164, 166, 168, 170. 172	125, 127, 141, 147, 161, 163

Примечания: 1. В скобках указаны числа пазов, при которых возможно повышение вибрации двигателей.

2. Звездочкой отмечены числа пазов, применяемые, в основном, в машинах малой мощности.

Ток в стержне определяется по (9.57), при этом с учетом принятых для короткозамкнутой обмотки чисел фаз и витков в фазе, а также влияния скоса пазов коэффициент приведения токов

$$\nu_i = \frac{m_1 w_1 k_{ОБ1}}{m_2 w_2 k_{ОБ2} k_{СК}} = \frac{2 m_1 w_1 k_{ОБ1}}{Z_2 k_{СК}} \qquad (9.66)$$

где $k_{ск}$ — коэффициент скоса, учитывающий уменьшение ЭДС обмотки при скошенных пазах ротора (см. гл. 3):

$$k_{СК} = \frac{2\sin(\gamma_{СК}/2)}{\gamma_{СК}}, \qquad (9.67)$$

здесь $\gamma_{ск} = \beta_{ск}\frac{2p}{Z}$; $\beta_{ск} = \frac{b_{СК}}{t_{Z2}}$; $b_{ск}$ — скос пазов, мм.

Сечение стержней, м²,

$$q_c \quad I_2/J_2. \tag{9.68}$$

Плотность тока в стержнях ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазов алюминием выбирается в пределах J_2 = (2,5...3,5)•10⁶ А/м², а при защищенном исполнении на 10...15 % выше, при этом для машин больших мощностей следует принимать
меньшие значения плотности тока.

В обмотке ротора, выполненной из медных стержней, плотность тока принимают несколько большей: J_2 = (4,0...8,0)•10⁶ А/м² (большие значения соответствуют машинам меньшей мощности).

Ток в короткозамыкающих кольцах находят, исходя из следующих соображений. Принимают направления токов в стержнях ротора $\dot{I}_{c1}$, $\dot{I}_{c2}$, $\dot{I}_{c3}$... и на участках замыкающих колец, соединяющих этихи стержни, $\dot{I}_{12}$, $\dot{I}_{23}$, $\dot{I}_{34}$, как показано на рис. 9.36, *а*. Тогда для узлов а, *b*, с и т. д. можно записать

$$\begin{aligned}\dot{I}_{c2} &= \dot{I}_{12} - \dot{I}_{23};\\ \dot{I}_{c3} &= \dot{I}_{23} - \dot{I}_{34};\\ \dot{I}_{4} &= \dot{I}_{34} - \dot{I}_{45}.\\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\end{aligned} \tag{9.69}$$

Токи в стержнях сдвинуты относительно друг друга на угол $a_z = 2p\pi / Z_2$. Начертив многоугольник токов в стержнях (рис. 9.36, б), стороны которого являются векторами токов стержней, сдвинутых по фазе на угол a_z, убеждаемся, что системе уравнений (9.69) будут соответствовать направления токов на участках колец, показанные на рис. 9.36, б. Угол между их векторами тоже равен a_z. Найдем соотношение между токами в стержнях и в участках колец, для чего рассмотрим один из треугольников векторной диаграммы, образованный, например, векторами токов $\dot{I}_{12}$, $\dot{I}_{23}$, $\dot{I}_{c2}$.

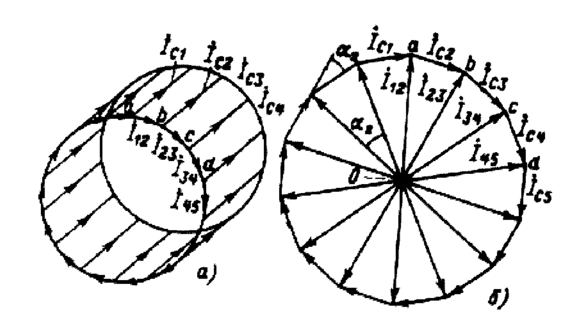


Рис. 9.36 К расчету токов в замыкающих кольцах короткозамкнутой обмотки ротора:
а — направления токов; б — векторная диаграмма токов обмотки

Из этого треугольника имеем

$$I_{c2} \quad 2\, I_{23} \sin \frac{a_z}{2}.$$

Так как это соотношение справедливо для любого из элементов диаграммы

токов, то, обозначив токи в кольце $I_{кл}$, а токи в стержнях I_2, можем записать

$$I_{кл} \quad I_2/\Delta, \tag{9.70}$$

где

$$\Delta = 2\,sin\,\frac{a_Z}{2} = 2\sin\frac{\pi p}{Z_2}. \tag{9.71}$$

Выражение (9.70) является расчетной формулой для определения тока в замыкающих кольцах короткозамкнутых роторов.

Плотность тока в замыкающих кольцах $J_{кл}$ выбирают в среднем на 15...20 % меньше, чем в стержнях. Это объясняется двумя причинами. Во-первых, замыкающие кольца, имеющие лучшие условия охлаждения по сравнению со стержнями, являются своего рода радиаторами, которые отводят тепло стержней, усиливая их охлаждение. Во-вторых, в машинах, в которых для улучшения пусковых характеристик используют эффект вытеснения тока, большое сопротивление замыкающих колец снижает кратность увеличения общего сопротивления обмотки ротора при пуске.

Площадь поперечного сечения замыкающих колец, м^2,

$$q_{кл} - I_{кл}/J_{кл}. \tag{9.72}$$

Замыкающие кольца в роторах со вставными стержнями из-за необходимости пайки или сварки их со стержнями устанавливают на некотором расстоянии от торцов ротора (рис. 9.37, а). Поперечное сечение колец представляет собой прямоугольник, размеры которого ($h_{кл}$ и $b_{кл}$) выбирают таким образом, что $h_{кл}$ = (1,1...1,25)$h_{п2}$.

В роторах с литой обмоткой замыкающие кольца, которые отливают одновременно с заливкой пазов, всегда плотно прилегают к торцам сердечника ротора. При этом они помимо своей основной функции выполняют и другую: удерживают в спрессованном состоянии листы сердечника ротора. Замыкающие кольца литой обмотки обычно выполняют с поперечным

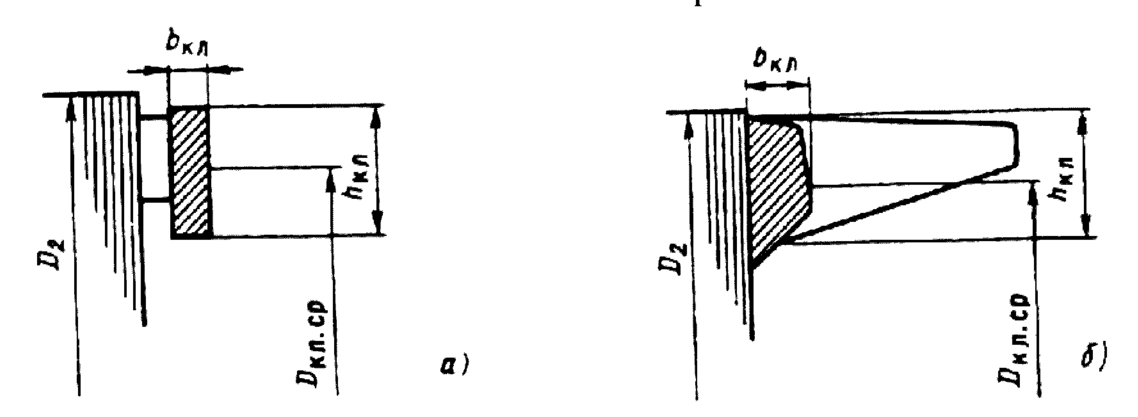


Рис. 9.37. Размеры замыкающих колец короткозамкнутого ротора:
а — со сварной обмоткой; б — с литой обмоткой

сечением в виде неправильной трапеции, прилегающей своим большим основанием к торцу ротора (рис. 9.37, б). Размеры $h_{кл}$ и $b_{кл}$, нужные для расчета, берут приближенно, исходя из конфигурации поперечного сечения кольца. Высоту сечения кольца выбирают $h_{кл} \geq 1{,}2\ h_{п2}$.

Ширину замыкающих колец обоих типов рассчитывают исходя из $q_{кл}$ полученной по (9.72), и выбранной $h_{кл}$:

$$b_{кл} \quad q_{кл}/h_{кл}. \tag{9.73}$$

Средний диаметр замыкающих колец, м,

$$D_{кл.ср} \quad D_2 - h_{кл}. \tag{9.74}$$

Одновременно с заливкой стержней и колец на замыкающих кольцах отливают вентиляционные лопатки длиной, несколько меньшей, чем длина вылета лобовых частей обмотки статора. Количество вентиляционных лопаток выбирают равным простому числу, приблизительно в 2—3 раза меньшему, чем число пазов ротора.

Расчетное сечение замыкающих колец литой обмотки, м^2, принимают равным $q_{кл} = h_{кл}\ b_{кл}$, не учитывая утолщения в местах примыкания вентиляционных лопаток.

Форма паза и конструкция обмотки короткозамкнутого ротора определяются требованиями к пусковым характеристикам двигателя и его мощностью. В асинхронных двигателях мощностью до50…60 кВт обычно выполняют грушевидные пазы и литую обмотку из алюминия (рис. 9.38, а). Размеры паза выбирают такими, чтобы торцы ротора имели параллельные грани.

Роторы более крупных машин с прямоугольными пазами выполняют со вставными медными стержнями или с литой алюминиевой обмоткой (рис. 9.38, в, г). Прямоугольные открытые пазы встречаются в короткозамкнутых роторах многополюсных асинхронных двигателей. Стержни обмотки, выполненные из алюминиевых шин прямоугольного сечения (рис. 9.38, д), устанавливают в открытые пазы ротора и закрепляют, расчеканивая их верхнюю часть.

Для увеличения пусковых моментов двигателей прямоугольные пазы делают узкими и глубокими, так как эффект вытеснения тока в них возрастает с увеличением высоты стержня. Роторы с такими пазами называют глубокопазными.

В асинхронных двигателях при небольшом числе полюсов часто не удается получить требуемый пусковой момент даже при глубокопазных роторах, поэтому переходят к роторам с фигурными пазами. Применяют различные конфигурации фигурных пазов (рис. 9.38, е – и). Все они имеют характерную особенность – уменьшенную ширину верхней части паза по сравнению с нижней, что позволяет в большей степени использовать эффект вытеснения тока при больших скольжениях.

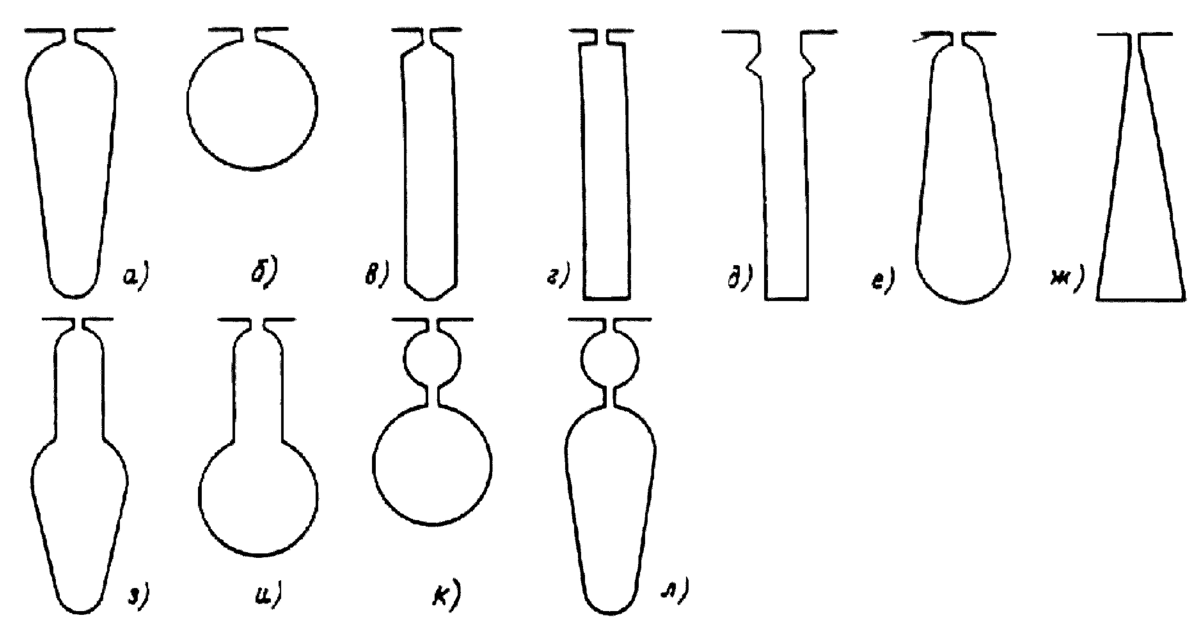


Рис. 9.38. Конфигурации пазов короткозамкнутых асинхронных двигателей

Короткозамкнутые обмотки роторов с пазами трапецеидальной формы выполняют как с заливкой пазов алюминием (рис. 9.38, ё), так и со сварной медной клеткой (рис. 9.38, ж), для стержней которой используют шинную медь соответствующего профиля.

Обмотки со стержнями более сложной формы, например, лопаточные стержни (рис. 9.38, з), выполняют заливкой алюминием или его сплавами. Колбообразные пазы с круглой нижней частью (рис. 9.38, и) в настоящее время почти не применяют из-за менее удачного, чем при лопаточных пазах, использования стали зубцовой зоны.

Асинхронные двигатели, предназначенные для приводов механизмов с тяжелыми условиями пуска, часто выполняют с двухклеточными роторами (рис. 9.38, к, л), в которых на каждом зубцовом делении размещены один над другим два стержня. Каждая система стержней образует свою обмотку: верхние стержни, лежащие ближе к зазору, — пусковую, а нижние — рабочую.

Двойную клетку выполняют в двух вариантах: с общими замыкающими кольцами (рис. 9.39, а), когда каждое кольцо замыкает одновременно стержни и пусковой, и рабочей клеток, либо с раздельными замыкающими кольцами (рис. 9.39, б). В последнем случае с каждого торца ротора располагают по два кольца, одно из которых замыкает только стержни пусковой, а другое — стержни рабочей клетки.

Обычное исполнение двойной клетки — сварное с раздельными кольцами. Рабочую обмотку (стержни и короткозамыкающие кольца) в большинстве случаев изготовляют из меди, а пусковую — из латуни. Латунь для пусковой клетки применяют из-за больших по сравнению с медью удельного сопротивления и теплоемкости.

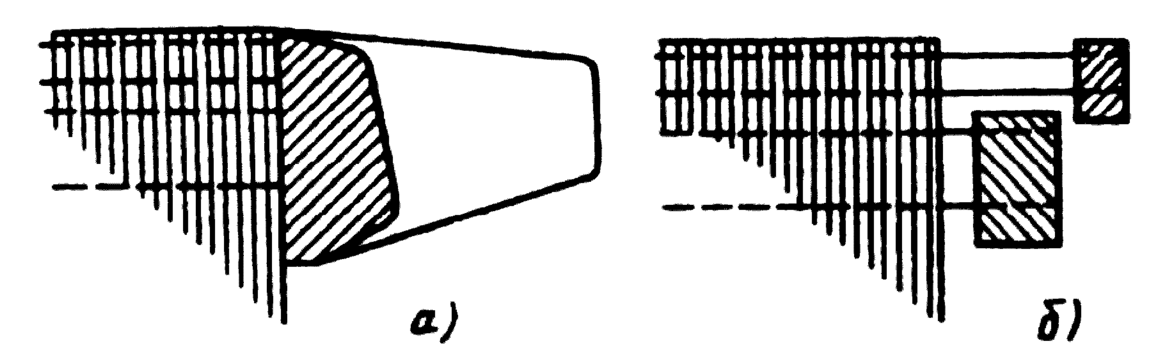


Рис. 9.39. Замыкающие кольца двухклеточных короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей:
а — общие; б — раздельные

Увеличение теплоемкости пусковой клетки особенно важно для машин с длительными тяжелыми пусками, за время которых потери в роторе могут нагреть пусковую обмотку до недопустимо высокой с температуры.

В современных машинах распространено также двухклеточное исполнение роторов с литыми обмотками (см. рис. 9.38, л). В таких конструкциях и пусковую, и рабочую клетки заливают одним металлом. Замыкающие кольца — общие, прилегающие к торцам ротора (рис. 9.39).

Выбирая ту или иную конструкцию клетки, форму и размерные соотношения стержней, следует исходить из требований к пусковым характеристикам двигателей и возможности размещения паза на зубцовом делении ротора, при котором обеспечивается нормальный уровень индукции в зубцах и ярме. Кроме того, необходимо учитывать влияние размерных соотношений пазов на индуктивное сопротивление обмотки ротора. При любой конфигурации паза уменьшение ширины верхней части стержней и увеличение их высоты приводят к увеличению пускового момента, но одновременно увеличивается коэффициент магнитной проводимости паза и растет индуктивное сопротивление обмотки ротора. Это в некоторых случаях может играть положительную роль — как фактор, ограничивающий пусковые токи, но в то же и время увеличение индуктивного сопротивления ротора приводит к ухудшению коэффициента мощности при номинальном режиме работы и к снижению M_{max}.

То же характерно для двигателей с двухклеточными роторами, имеющими большие пусковые моменты, но низкие коэффициенты мощности при номинальном режиме, так как поток пазового рассеяния в перемычке между стержнями рабочей и пусковой клеток достигает
больших значений. Поэтому для обеспечения высоких энергетических показателей номинального режима следует, прежде всего, ориентироваться на пазы ротора с широкой верхней частью — грушевидные (см. рис. 9.38, а). Пазы других форм (прямоугольные, фигурные) или двойную клетку применяют только в том случае, когда пусковые характеристики двигателя с ротором, имеющим

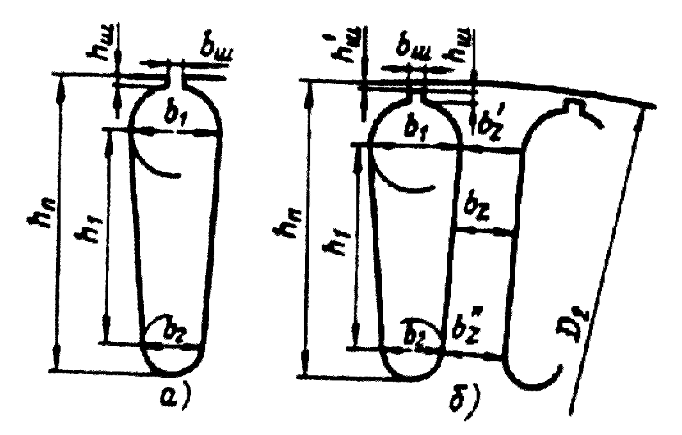


Рис. 9.40. Трапецеидальные пазы короткозамкнутого ротора: а — полузакрытые; б — закрытые

грушевидные пазы, не удовлетворяют требованиям, поставленным в техническом задании.

В большинстве асинхронны; двигателей с короткозамкнутым ротором с высотой оси вращения h $\leq$ 250 мм выполняют трапецеидальные пазы и литую обмотку на роторе (рис. 9.40). Размерные соотношения пазов b_1, b_2 и h_1 обеспечивают параллельность боковых граней зубцов. В двигателях с h < 160 мм пазы имеют узкую прорезь со следующими размерами: $b_ш$ = 1,0 мм и $h_ш$ = 0,5 мм при высоте оси вращения h < 100 мм; $b_ш$ = 1,5 мм и $h_ш$ = 0,75 мм при высоте вращения h = 112...132 мм. В двигателях с h = 160...250 мм выполняют трапецеидальные закрытые пазы (рис. 9.40, б) с размерами шлица $b_ш$ = 1,5 мм и $h_ш$ = 0,7 мм. Высота перемычки над пазом в двигателях с 2р > 4 выполняется равной $h'_ш$ =0,3 мм, в двухполюсных двигателях $h'_ш$ = 1,0...1,5 мм.

Размеры паза ротора рассчитывают исходя из требуемого сечения стержня q_c, полученного по (9.68), допустимой индукции в зубце и из условия постоянства ширины зубца, т. е. параллельности его граней.

По допустимой индукции (см. табл. 9.12) определяют ширину зубца ротора:

$$b_{Z2} = \frac{B_\delta t_{Z2} l_\delta}{B_{Z2} l_{CT2} k_C}. \tag{9.75}$$

После чего рассчитывают размеры паза (рис. 9.40):

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_Ш - 2h_Ш) - Z_2 b_{Z2}}{\pi + Z_2}; \tag{9.76}$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2(Z_2/\pi\, D_2 + \pi/2) - 4q_C}{Z_2/\pi + \pi/2}}; \tag{9.77}$$

$$h_1 = (b_1 - b_2)\frac{Z_2}{2\pi}. \tag{9.78}$$

После расчета размеры паза следует округлить до десятых долей миллиметра и уточнить площадь сечения, стержня q_c:

$$q_c = \frac{q}{8}(b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2}(b_1 + b_2)h_1. \tag{9.79}$$

Условия высококачественной заливки пазов алюминием требуют, чтобы диаметр закругления нижней части паза в двигателях с h $\leq$ 132 мм был не менее

1,5...2 мм, в двигателях с h ≥ 160 мм — не менее 2,5...3 мм.

В связи с округлениями результатов расчета необходимо просчитать ширину зубцов в сечениях b'_{Z2} и b'_{Z2} по окончательно принятым размерам паза:

$$b_{Z2} = \pi \frac{D_2 - 2(h_Ш + h'_Ш) - b_1}{Z_2} - b_1; \tag{9.80}$$

$$b_{Z2} = \frac{D_2 - 2h_П + b_2}{Z_2} - b_2. \tag{9.81}$$

При небольшом расхождении размеров b'_{Z2} и b''_{Z2} в расчете магнитного напряжения зубцов ротора используется средняя ширина зубца $b_{z2} = (b'_{Z2} + b''_{z2}) / 2$. При заметных расхождениях расчет проводят так же, как для трапецеидальных зубцов ротора (см. ниже).

Расчетная высота зубца принимается равной:

$$h_{z2} = h_п \quad 0,1\, b_2. \tag{9.82}$$

В двигателях с высотой оси вращения h = 280...355 мм выполняют закрытые пазы ротора: при 2р ≥ 4 — трапецеидальные, сужающиеся в верхней части, и при 2р = 2 — лопаточные (рис. 9.41).

Для расчета размеров трапецеидальных сужающихся в верхней части пазов целесообразно использовать графоаналитический метод, аналогичный описанному в § 6.5 для пазов всыпной обмотки статора. Наименьшая допустимая ширина зубца b_{Zimm} находится по B_{Z2max} (см. табл. 9.12). На построенном в достаточно большом масштабе эскизе зубцового деления ротора, изменяя b_2 и $b_п$, графически определяют размеры паза по заданной площади сечения стержня q_c, при которых B_{Z2max} остается в допустимых пределах. Высота перемычки над пазом принимается равной $h'_ш$ = 0,5 мм.

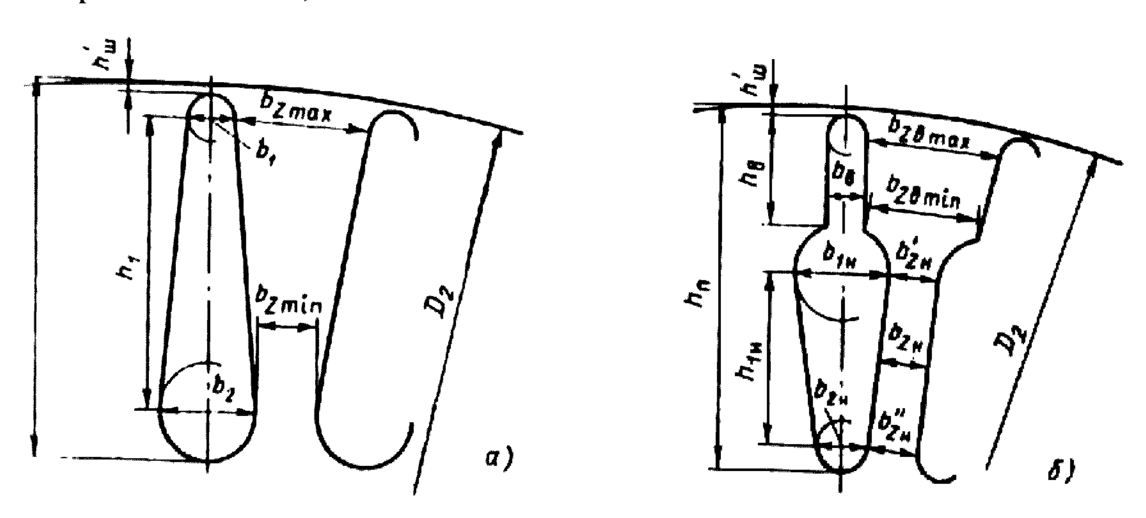


Рис. 9.41. Характерные размеры зубцовой зоны короткозамкнутого ротора:
а — с трапецеидальными пазами; б — с лопаточными пазами

Диаметр закругления верхней части паза должен быть не менее $b_1 \geq 3{,}5...4$ мм. После построения определяют ширину зубца ротора:

$$b_{Z2\max} = \pi \frac{D_2 - (2h_Ш + b_1)}{Z_2} - b_1; \tag{9.83}$$

$$b_{Z2\min} = \pi \frac{D_2 - (2h_П - b_{П2})}{Z_2} - b_2. \tag{9.84}$$

Расчетная высота зубца

$$h_{z2} = h_п - 0{,}1b_2. \tag{9.85}$$

В лопаточных пазах (рис. 9.41, б) высоту верхней части паза $h_в$ для получения наибольшего эффекта вытеснения тока во время пуска при литой алюминиевой обмотке выполняют равной 15...16 мм. Размеры нижней части лопаточных стержней рассчитывают, исходя из сечения стержня $q_с$ и постоянства ширины зубцов ротора:

$$b_{1H} = \frac{\pi(D_2 - 2h_Ш - 2h_B) - Z_2 b_{Z2H}}{Z_2 + \pi} \tag{9.86}$$

где $b_{Z2н}$ — ширина зубца на нижнем участке, определяемая по допустимой индукции в зубцах ротора (см. табл. 9.12); $h'_ш$ — высота перемычки над пазом. Для двигателей с 2р = 2 принимают $h'_ш$ - 1...2 мм.

Ширина верхней части стержня

$$b_B = (0{,}5...0{,}65)\, b_{1н}. \tag{9.87}$$

Требуемое сечение нижней части стержня

$$q_{с.н} = q_с - q_{с.в.}. \tag{9.88}$$

где сечение верхней части стержня

$$q_{с.в.} = b_в(h_в - 0{,}11\, b_в). \tag{9.89}$$

Диаметр закругления нижней части стержня

$$b_{2H} = \sqrt{\frac{b_{1H}^2\left[\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right] - 4q_{C.H}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} \tag{9.90}$$

Наименьший допустимый размер $b_{2н} = 3...4$ мм.

Если по (9.90) $b_{2н} < 3$ мм, следует или уменьшить сечение стержня (увеличить плотность тока в нем), или несколько увеличить индукцию в зубцах ротора.

Расстояние между центрами закруглений нижней части стержня

$$h_{1н} = (b_{1н} - b_{2н})\, \frac{Z_2}{2\pi} \tag{9.91}$$

После округления полученных размеров до десятых долей миллиметра уточняют площадь сечения стержня ротора: $q_{с.в.}$ по (9.89) и

$$q_{с.н} = \frac{\pi}{8}(b_{1Н}^2 + b_{2Н}^2) + (b_{1Н} + b_{2Н})\frac{h_{1Н}}{2}; \qquad (9.92)$$

$$q_c = q_{с.в} + q_{с.н} \qquad (9.93)$$

Размеры зубцов в верхних и нижних частях рассчитывают раздельно.
Размеры верхней части зубца:

$$B_{Zв\,max} = \pi\frac{D_2 - (2h_Ш + b_В)}{Z_2} - b_В; \qquad (9.94)$$

$$b_{Zв\,min} = \pi\frac{D_2 - 2h_В}{Z_2} - b_В, \qquad (9.95)$$

где $h'_в = h_в + h'_ш$.

Размеры нижней части зубца:

$$b_{Zн} = \pi\frac{D_2 - 2h_В - b_{1Н}}{Z_2} - b_{1Н}; \qquad (9.96)$$

$$b_{Zн} = \pi\frac{D_2 - (2h_П - b_{2Н})}{Z_2} - b_{2Н}; \qquad (9.97)$$

Расчетная высота участков зубца:
верхнего

$$h_{Zв} = h'_в; \qquad (9.98)$$

нижнего

$$a_{Zн} = h_н - 0{,}1b_{2н}. \qquad (9.99)$$

В короткозамкнутых роторах с обмоткой из вставных алюминиевых шин выполняют открытые прямоугольные пазы (рис. 9.42). Размеры паза находят исходя из допустимой ширины зубца b_{Z2min}, определенной по допустимой B_{z2max} (см. табл. 9.12). Ширина паза

$$b_П = \frac{(t_{Z2} - b_{Z2\,min}) \pm \sqrt{(t_{Z2} - b_{Z2\,min})^2 - S_{П2}\frac{8\pi}{Z_2}}}{2} \qquad (9.100)$$

где $S_{п2}$ — полная площадь поперечного сечения паза, которую предварительно берут равной:

$$S_{п2} \approx 1{,}1\,q_c.$$

Из двух возможных значений $b_п$, полученных по (9.100), следует выбрать значение, удовлетворяющее требованиям конструкции. Ширина алюминиевой шины должна быть меньше ширины паза в штампе на припуск на сборку сердечника $\Delta b_П$ (см. табл. 9.14).

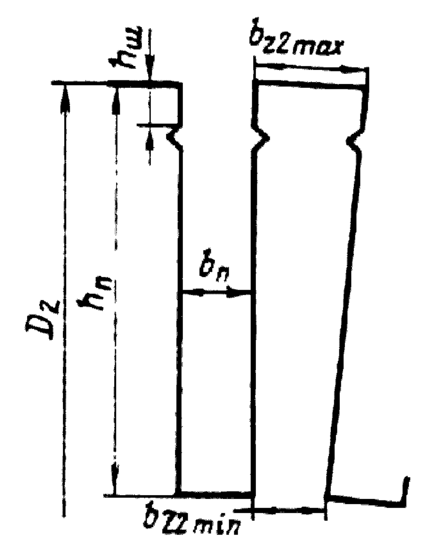


Рис. 9.42. Характерные размеры зубцовой зоны короткозамкнутого ротора с обмоткой из вставных прямоугольных алюминиевых шин

Размеры паза окончательно определяют после выбора стандартного сечения и размеров алюминиевой шины (табл. П 3.7).

Высота паза

$$h_П = h_c + \Delta h_П + h_ш, \qquad (9.101)$$

где $\Delta h_П$ определяют по табл. 9.14; $h_ш$ — высота шлица, в роторах такой конструкции выполняется равной 4 мм;

высота стержня

$$h_c = q_c / b_c.$$

Наибольшая и наименьшая ширины зубцов при прямоугольных пазах ротора определяются по (9.61) и (9.63). Расчетная высота зубца принимается равной высоте паза:

$$h_z = h_п.$$

9.8.3. *Сердечники роторов*

Сердечники роторов асинхронных двигателей при D_2 < 990 выполняют с непосредственной посадкой на вал без промежуточной втулки. В двигателях с высотой оси вращения h ≤ 250 мм применяют посадку сердечников на гладкий вал без шпонки. В двигателях больших размеров сердечники крепят на валу с помощью шпонки. Ее диаметр ротора превышает 990 мм, то сердечник шихтуют из отдельных сегментов и крепят на втулке ротора или на продольных ребрах, приваренных к валу (оребренные валы) (см. гл. 8).

В большинстве двигателей с высотой оси вращения h ≥ 250 выполняют аксиальные каналы в целях некоторого улучшения условий охлаждения ротора и снижения его массы и момента инерции.

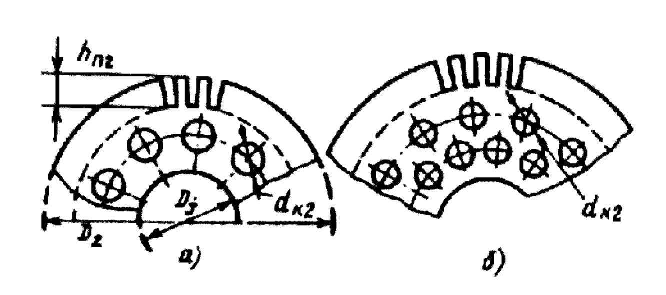


Рис. 9.43. Аксиальные вентиляционные каналы в сердечнике ротора:
а – расположение каналов в один ряд ($m_{к2}$ = 1);
б — расположение каналов в два ряда ($m_{к2}$ = 2)

Аксиальные каналы (рис. 9.43) могут быть расположены в одном ряду ($m_{к2}$ = 1) или при больших диаметрах ротора в двух рядах ($m_{к2}$ = 2). Число аксиальных каналов в сердечнике ротора обычно колеблется от 9 до 12, а их диаметр ($d_{к2}$) — в пределах от 15 до 30 мм. Большие диаметры выполняют в роторах двигателей с большим числом полюсов. При расположении каналов в два ряда их диаметры уменьшают.

Радиальные каналы в сердечнике ротора, так же как и в статоре, выполняют лишь при длине сердечника, превышающей 0,25...0,3 м. В таких роторах необходимо предусматривать также и выполнение аксиальных каналов, которые служат для прохода охлаждающего воздуха к радиальным каналам.

Наличие каналов, их диаметр и расположение оказывают влияние, на магнитное напряжение ярма ротора и должны учитываться при расчете магнитной цепи.

Внутренний диаметр сердечника ротора D_j при непосредственной посадке на вал равен диаметру вала $D_В$ и может быть определен по формуле

$$D_В \approx k_В D_a. \qquad (9.102)$$

Значения коэффициента $k_В$ даны в табл. 9.19.

Таблица 9.19. Значения коэффициента

h, мм	50...63	71. ..250	280...355		400.. .500		
2р	2...6	2...8	2	4...12	4	6	8...12
$k_В$	0,19	0,23	0,22	0,23	0,2	0,23	0,25

Если сердечник ротора насажен на втулку или оребренный вал, то внутренний диаметр D_j, м, определяется исходя из допустимой индукции в ярме ротора (см. § 9.9) с использованием следующих выражений:

$$h_j = \Phi/(2B_j l_{\text{ст}2} k_c); \qquad D_j = D_2 - 2(h_{\text{п}2} + h_j).$$

9.9. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи проводят для режима холостого хода двигателей, при котором для асинхронных машин характерно относительно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора. Как отмечено в гл. 4, насыщение зубцовых зон приводит к уплощению кривой поля в воздушном зазоре (рис. 9.44). Пересечение реальной (уплощенной) кривой поля 2 в зазоре с основной гармонической 1 происходит в точках, отстоящих от оси симметрии одного полупериода кривой на угол 35°. Поэтому за расчетную индукцию принимается не амплитудное значение, а $B_{расч} = B_{max} \cos\psi \approx B_{max} \cos 35° \approx 0{,}82\, B_{max}$. По $B_{расч}$ следует определить $H_{расч}$ по основной кривой

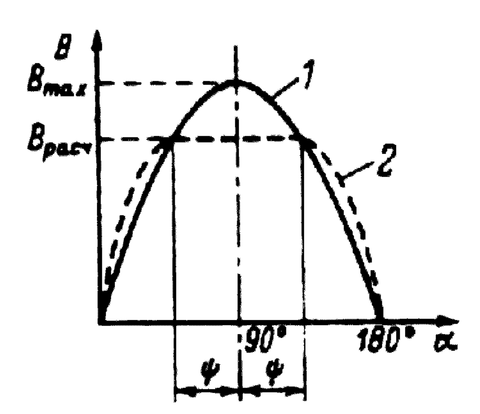


Рис. 9.44. Распределение индукции в воздушном зазоре асинхронного двигателя:
1 — ненасыщенного (синусоидальная кривая);
2 — насыщенного (уплощенная кривая)

намагничивания и увеличить затем результат в k = 1/ 0,82 раз, приведя напряженность к амплитудному значению индукции. Для воздушного зазора, имеющего линейную зависимость Н = f (В), эта операция равносильна непосредственному определению магнитного напряжения зазора по B_δ. При определении магнитных напряжений участков магнитной цепи с нелинейными магнитными характеристиками влияние уплощения учитывается специальными кривыми намагничивания для зубцов и ярм асинхронных двигателей, построенными по основной кривой намагничивания с учетом указанных зависимостей. При этом принимают

$$a_\delta \quad 2/\pi \approx 0{,}637 \text{ и } k_в \quad \pi/(2\sqrt{2}) \approx 1{,}11.$$

Марку электротехнической стали рекомендуется выбирать в зависимости от высоты оси вращения проектируемого асинхронного двигателя:

Марка стали.........	2013	2212	2214	2312	2412
Высота оси вращения, мм.	45...250	160...250	71...250	280...355	280...560

Расчет магнитной цепи проводят в следующей последовательности.

9.9.7. *Магнитное напряжение воздушного зазора*

Расчет магнитного напряжения воздушного зазора, как и всех последующих участков магнитной цепи, рекомендуется проводить на два полюса машины, т.е. вдоль замкнутой силовой линии потока полюса. Возможен также расчет на один полюс, при этом полученные по расчетным формулам данного параграфа магнитные напряжения участков цепи F_i, необходимо уменьшить в 2 раза, а при определении намагничивающего тока (см. ниже) суммарное магнитное напряжение всей цепи соответственно увеличить в 2 раза. Окончательный результат от этого не меняется.

Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta, \qquad (9.103)$$

где B_δ — индукция в воздушном зазоре, Тл, рассчитанная по (9.23) по окончательно принятому числу витков в фазе обмотки w_1 и обмоточному коэффициенту $k_{об1}$ определенному для принятой в машине обмотки; δ – воздушный зазор, м; k_δ – коэффициент воздушного зазора, рассчитанный по (4.15) или (4.16); μ_0 — магнитная проницаемость: $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

9.9.2. *Магнитное напряжение зубцовой зоны статора*

Общая формула для расчета магнитного напряжения зубцовой зоны статора

$$F_{Z1} = 2h_{z1} H_{z1}, \qquad (9.104)$$

где h_{z1} — расчетная высота зубца статора, м; H_{z1} — расчетная напряженность поля в зубце, А. Напряженность поля в зубце определяют по кривым намагничивания для зубцов принятой при проектировании марки стали (см. Приложения 1 и 2).

Расчетную высоту зубцов h_{z1} и расчетную напряженность поля H_{z1} определяют по-разному в зависимости от конфигурации зубцов, связанной с формой пазов статора.

Зубцы с параллельными гранями (в статорах с грушевидными или трапецеидальными пазами по рис. 9.29). Индукция в зубце

$$B_{Z1} = \frac{B_\delta b_{Z1} l_\delta}{B_{Z1} l_{CT1} k_{C1}}, \qquad (9.105)$$

где h_{Z1} — расчетная ширина зубца, м, определяется по формулам табл. 9.15; если размеры b'_{Z1} и b''_{Z1} одинаковы, то $b_{z1} = b'_{z1} = b''_{z1}$; если размеры b'_{Z1} и b''_{z1} различаются менее чем на 0,5 мм, то $b_{z1} = 0{,}5(b'_{z1} + b''_{z1})$. При различии, превышающем 0,5 мм, следует либо скорректировать размеры паза, либо определить расчетную напряженность поля H_{z1} как для зубцов с изменяющейся площадью поперечного сечения (см. ниже); k_{c1} — коэффициент заполнения сталью сердечника статора (см. табл. 9.13).

Расчетная напряженность поля, А/м, $H_{z1} = f(B_{z1})$.

Расчетная высота паза h_{z1} определяется по табл. 9.17.

Магнитное напряжение зубцовой зоны

$$F_{Z1} = 2h_{Z1} H_{Z1}. \qquad (9.105а)$$

Зубцы с изменяющейся площадью поперечного сечения (в статорах с прямоугольными пазами по рис. 9.28). Расчетная высота зубца $h_{Z1} = h_{П}$. Расчетная напряженность поля

$$H_{z1} = (H_{Z1max} + 4H_{Z1cp} + H_{Z1min})/6, \qquad (9.106)$$

где H_{z1max}, H_{z1min} и H_{z1cp} — напряженности поля в наименьшем, наибольшем и среднем сечениях зубца, определяемые по индукциям в этих сечениях : B_{Z1max}, B_{Z1min} и $B_{z1cp} = 0{,}5(B_{Z1max} + B_{Z1min})$.

Индукции B_{z1max} и B_{z1min} рассчитывают по (9.105), подставляя в формулу вместо размера b_{z1} соответственно наименьшее и наибольшее значения ширины зубца, м, рассчитанные по формулам табл. 9.15.

Магнитное напряжение зубцовой зоны, А,

$$F_{z1} = 2h_{z1} H_{z1}. \qquad (9.107)$$

Практикуют также определение расчетной напряженности по индукции в поперечном сечении зубца на расстоянии 1/3 высоты от его наиболее узкой части. В этом случае в (9.105) вместо b_{z1} подставляют значение $b_{z1/3}$ (см. табл. 9.15). Расчетная напряженность поля в зубце Hz1 = $H_{z1/3} = f B_{z1/3}$.

Если индукция в каком-либо одном или в нескольких сечениях зубца окажется больше 1,8 Тл, то необходимо учесть ответвление части потока зубцового деления $Ф_{tz} = B_{\delta}\, t_{z1}\, l_{\delta}$ в паз, при котором действительная индукция в зубце уменьшается по сравнению с рассчитанной по (9.105). Метод определения действительной индукции изложен в гл. 4. При его использовании коэффициенты $k_{П}$ рассчитывают для каждого из сечений зубца, в котором индукция превышает 1,8 Тл, и соответствующего ему по высоте сечения паза. По значению $k_{П}$ и расчетной индукции определяют действительную индукцию в данном сечении зубца.

В зубцах с параллельными гранями при индукции выше 1,8 Тл коэффициент $k_{П}$ рассчитывают по соотношению площадей поперечных сечений зубца и паза на середине высоты зубца. В зубцах с изменяющейся площадью поперечного сечения при определении расчетной напряженности по $B_{z1/3}$ коэффициент $k_{П}$ рассчитывают по соотношению площадей поперечных сечений зубца и паза на высоте 1/3 наиболее узкой части зубца. Это приводит к некоторой погрешности в определении расчетной напряженности поля в зубце, но при средних уровнях индукций, характерных для зубцовой зоны статора, эта погрешность не оказывает заметного влияния на результаты расчета.

9.9.3. *Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора*

Расчет магнитного сопротивления зубцовой зоны ротора зависит от формы пазов и типа ротора: фазный ротор или короткозамкнутый с одной обмоткой (беличьей клеткой) или короткозамкнутый ротор с двумя обмотками — рабочей и пусковой (ротор с двойной беличьей клеткой). К последнему типу относят также одноклеточные короткозамкнутые роторы с одной беличьей клеткой, имеющие фигурные пазы — лопаточные или колбообразные, которые при расчете рассматривают как роторы с двойной беличьей клеткой.

Магнитное напряжение зубцовой зоны фазного и короткозамкнутого роторов с одной беличьей клеткой с прямоугольными или с трапецеидальными пазами (по рис. 9,32, а, б; 9.40 и 9.41, а). Общая формула расчета магнитного напряжения

$$F_{z2} = 2h_{z2}\, H_{z2}. \tag{9.108}$$

где h_{z2} — расчетная высота зубца (по табл. 9.20), м; H_{z2} — расчетная напряженность поля в зубце ротора, А/м.

Таблица 9.20. Размеры зубцов фазных и короткозамкнутых одноклеточных роторов с прямоугольными и трапецеидальными пазами

Размер	Форма пазов ротора по рис. 9.40			
	9.32, а; 9.42	9.32, 6	9.40, а, б	9.41, а
$b_{Z\max}$	$\frac{\pi D_2}{Z_2} - b_П$	$\pi \frac{D_2 - 2(h_Ш - h_К)}{Z_2} - b_П$	—	$\pi \frac{D_2 - (2 h_Ш + b_1)}{Z_2} - b_1$
$b_{Z\min}$	$\pi \frac{D_2 - 2 h_П}{Z_2} - b_П$		—	$\pi \frac{D_2 - 2(h_П - b_2)}{Z_2} - b_2$
$b_{Z1/3}$	$\pi \frac{D_2 - \frac{4}{3} h_П}{Z_2} - b_П$		—	$b_{Z\min} + \frac{b_{Z\max} + 2 b_{Z\min}}{3}$
h_Z	—	—	$h_П - 0{,}1\, b_2$	$h_П - 0{,}1\, b_2$
b'_Z	—	—	$\pi \frac{D_2 - 2(h_Ш - h_Ш)}{Z_2} - b_1$	—
b''_Z	—	—	$\pi \frac{D_2 - 2(h_П - h_2)}{Z_2} - b_2$	—

Расчетная напряженность поля H_{z2} в зубцах с параллельными гранями (см. рис. 9.40, а, б), Тл, определяется в зависимости от индукции в зубце

$$B_{Z2} = \frac{B_\delta B_{Z2} l_\delta}{B_{Z2} l_{CT2} k_{C2}}, \qquad (9.109)$$

где k_{c2} — коэффициент заполнения сердечника ротора сталью (см. табл. 9.13); b_{Z2} — ширина зубца ротора, м, определяется по формулам табл. 9.20.

Если расчеты b'_{Z2} и b''_{Z2} (табл. 9.20) дают одинаковые результаты, то $b_{z2} = b'_{Z2}2 = b''_{Z2}$. Если полученные размеры b'_{Z2} и b''_{Z2} различаются менее чем на 0,5 мм, то $b_{Z2} = 0,5\ (b'_{Z2} + b''_{Z2})$.

При различии, превышающем 0,5 мм, следует либо скорректировать размеры паза с целью уменьшить это различие, либо определить расчетную напряженность поля как для зубцов ротора с изменяющейся площадью поперечного сечения (см. ниже).

Расчетная напряженность поля в зубце

$$H_{Z2} = f(B_{Z2}).$$

Расчетная напряженность поля в зубцах ротора с изменяющейся площадью поперечного сечения (по рис. 9.32; 9.41, *а*, 9.42). Расчетная напряженность поля определяется как средняя

$$H_{Z2} = (H_{Z2max} + 4\,H_{Z2cp} + H_{Z2min})/6, \qquad (9.\ 110)$$

где H_{Z2max}, H_{Z2min}, и H_{Z2cp} — напряженности поля в наибольшем, наименьшем и среднем сечениях зубца, определяемые по индукциям в этих сечениях зубцов B_{Z2max}, B_{Z2min}, и $B_{Z2cp} = 0,5\ (B_{Z2max} + B_{Z2min})$.

Индукции B_{z2max} и B_{z2min} рассчитывают по (9.109), подставляя в эту формулу вместо размера b_{Z2} соответственно наименьшее (b_{z2min}) и наибольшее (B_{z2max}) значения ширины зубца, полученные по формулам табл. 9.20.

При расчете магнитного напряжения по напряженности поля в сечении на 1/3 высоты зубца ротора находят индукцию $B_{Z1/3}$, подставляя в формулу (9.109) вместо b_{Z2} ширину зубца $b_{z1/3}$ (табл. 9.20). В этом случае расчетная напряженность

$$H_{Z2} = H_{Z1\ 3} = f(B_{Z1\ 3}).$$

Если при расчете магнитного напряжения зубцов с переменным сечением $H_{Z2max} > 2\ H_{Z2min}$, то более точные результаты дает деление зубца по высоте на две равные части и определение средних напряженностей в каждой из них в отдельности. В этом случае расчетная ширина зубца принимается на высоте 1/3 каждой части, т. е. на высоте, приблизительно равной 0,2 и 0,7 всей высоты паза от его наиболее узкой части:

$$\left.\begin{aligned} b_{Z0,2} &= b_{Z2\min} + 0{,}2(b_{Z2\max} - b_{Z2\min}); \\ b_{Z0,7} &= b_{Z2\min} + 0{,}7(b_{Z2\max} - b_{Z2\min}). \end{aligned}\right\} \qquad (9.111)$$

Определив индукцию $B_{z0,2}$ и $B_{z0,7}$ в этих сечениях зубца, находят соответствующие им напряженности поля $H_{Z0,2}$ и $H_{Z0,7}$. Магнитное напряжение зубцовой зоны, А, в этом случае

$$F_{z2} \quad h_{z2}(H_{z0,2} + H_{z0,7}), \qquad (9.112)$$

Необходимо отметить, что для всех сечений зубцов, расчетная индукция в которых превышает 1,8 Тл, необходимо определить действительную индукцию, т. е. учесть уменьшение потока в зубце за счет ответвления части потока зубцового деления в паз, как это указано в расчете зубцового напряжения зубцовой зоны статора.

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора с фигурными пазами и с двойной беличьей клеткой. При фигурных пазах ротора или двойной беличьей клетке рассчитывают раздельно магнитные напряжения верхней и нижней частей зубцов, А:

$$\left.\begin{aligned} F_{Z2B} &= h_{Z2B} H_{Z2B}; \\ F_{Z2H} &= h_{Z2H} H_{Z2H}, \end{aligned}\right\} \qquad (9.113)$$

где h_{z2B} и h_{z2H} — расчетные высоты верхней и нижней частей зубца, м, определяемые по формулам табл. 9.21 и 9.20; H_{z2B} и H_{z2H} — расчетные напряженности верхней и нижней частей зубца, А/м.

Расчет индукции для определения расчетных напряженностей H_{z2B} и H_{z2H} проводят по формулам, аналогичным приведенным выше для одноклеточных роторов, формулы для определения ширины зубцов в различных сечениях приведены в табл. 9.21 и 9.22 в зависимости от конфигурации пазов (рис. 9.45 и 9.46).

Магнитное напряжение зубцовой зоны роторов с фигурными пазами или с двойной беличьей клеткой, А/м,

$$F_{Z2} \quad 2\,(F_{z2B}, + F_{z2H}). \qquad (9.114)$$

Учет ответвления потока в паз при индукциях выше 1,8 Тл при расчете магнитного напряжения так же обязателен, как и при расчете зубцовых зон с другими конфигурациями пазов.

После расчета магнитных напряжений F_δ, F_{z1} и F_{z2} определяют коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_\delta} \qquad (9.115)$$

Полученное значение k_z позволяет предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных проектируемой машины. Если $k_z > 1{,}5...1{,}6$, имеет место чрезмерное

Таблица 9.21. Размеры зубцов роторов асинхронных двигателей с фигурными пазами

Размер	Форма пазов ротора по рис. 9.40			
	9.45, а	9.45, 6	9.45, в	9.45, г
$b_{Z\max}$	$\pi\frac{D_2-2h_{Ш}}{Z_2}-b_{B}$	$\pi\frac{D_2-2(h_{\O}-h_{\acute{A}})}{Z_2}-b_{\acute{A}}$	$\pi\frac{D_2-2(h_{\O}-h_{\acute{A}})}{Z_2}-b_{\acute{A}}$	$\pi\frac{D_2-2(h_{\O}-\frac{d}{3})}{Z_2}-0{,}94d$
$b_{Z\min}$	$\pi\frac{D_2-2h_{B}}{Z_2}-b_{B}$	$\pi\frac{D_2-2h_{B}}{Z_2}-b_{B}$	$\pi\frac{D_2-2h_{B}}{Z_2}-b_{B}$	
$h_{ZВ}$	$h'_{В}$	$h'_{В}$	$h'_{В}$	$0{,}9+h_{Ш}$
$b_{Zн\,max}$	$\pi\frac{D_2-2h_{B}}{Z_2}-b_{H}$	$\pi\frac{D_2-2h_{B}}{Z_2}-b_{H}=$	$\pi\frac{D_2-2(h_{\acute{A}}+\frac{1}{3}b_{H})}{Z_2}-0{,}94\,b_{H}$	—
$b_{Zн\,min}$	$\pi\frac{D_2-2h_{П}}{Z_2}-b_{H}$	$=\pi\frac{D_2-(2h_{П}-b_{H})}{Z_2}-b_{H}$		
$h_{Zн}$	$h_{Н}$	$h_{И}-0{,}1\,b_{Н}$	$0{,}9\,b_{Н}$	—

Таблица 9.22. Размеры зубцов двойной клетки короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей

Размер	Форма пазов ротора по рис. 9.45		
	9.46,а	9.45, б	9.45, в
$b_{Z\,в.ср}$	$\frac{D_2 - 2(h_Ш + \frac{1}{3} b_В)}{Z_2} - 0{,}94\, b_В$		
$h_{ZВ}$	$0{,}9\, b_В + h_Ш$		
$b_{ZН\,max}$	—	$\pi \frac{D_2 - 2(h_В + h_0)}{Z_2} - b_Н$	—
$b_{ZН\,min}$	—	$\pi \frac{D_2 - 2 h_П}{Z_2} - b_Н$	—
$b_{ZН\,ср}$	$\pi \frac{D_2 - 2(h_В + h_0 + 1{,}3\, b_Н)}{Z_2} - 0{,}94\, b_Н$	$\frac{b_{ZН\max} + b_{ZН\min}}{2}$	$\pi \frac{D_2 - (2 h_П + b_{Н2})}{Z_2} - b_{Н2}$
$h_{Z\,Н}$	$0{,}9\, b_Н$	$h'_Н - h_0$	$h'_Н - h_0 - 0{,}1\, b_{Н2}$

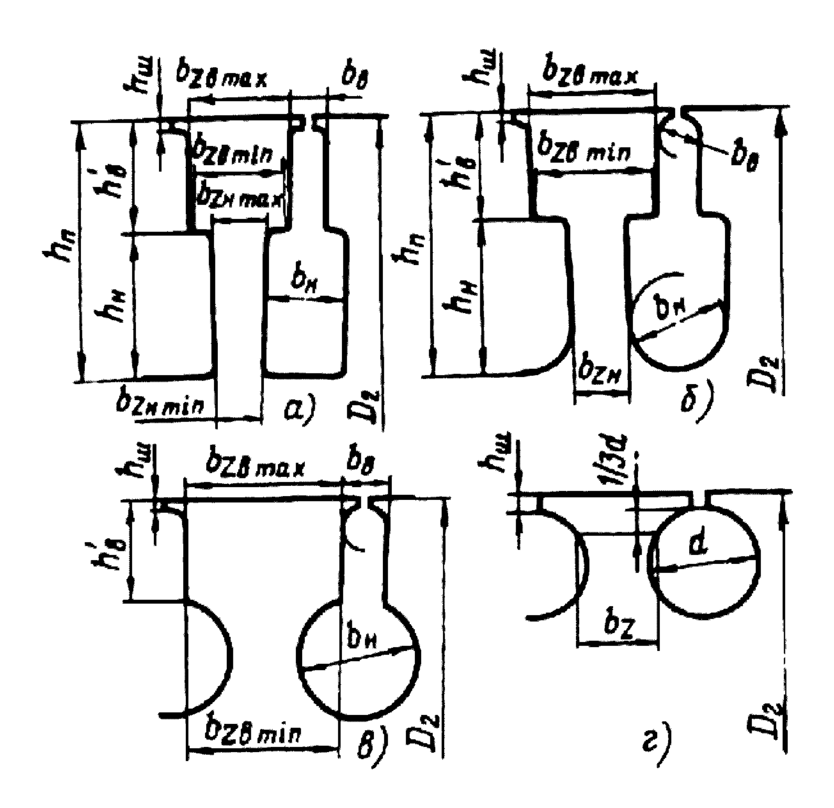


Рис. 9.45. Обозначение размеров зубцовой зоны короткозамкнутых роторов с фигурными пазами: *а – г* — различные формы пазов ротора

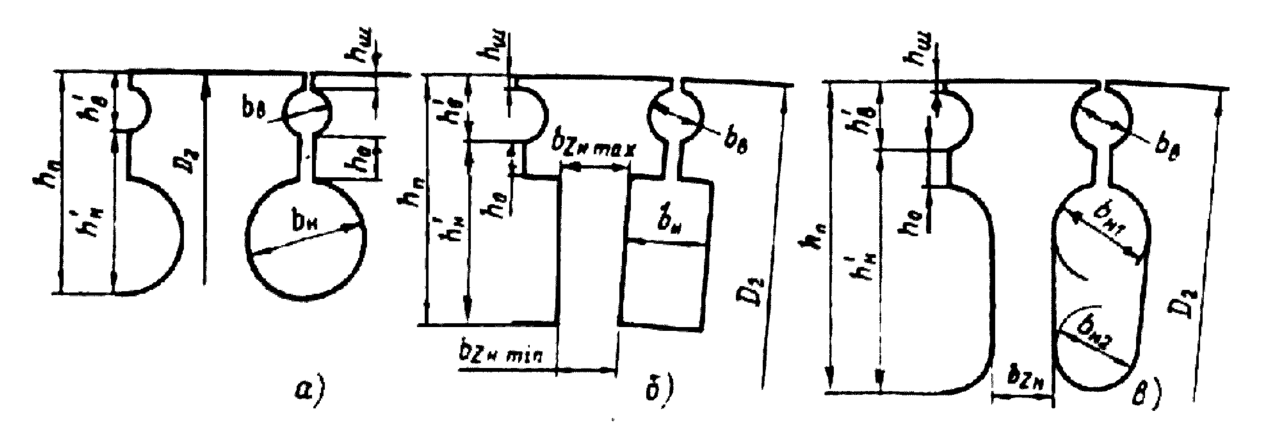


Рис. 9.46. Обозначения размеров зубцовой зоны короткозамкнутых роторов с двойной беличьей клеткой:
а — *в* — различные конфигурации пазов двухклеточных роторов

насыщение зубцовой зоны; если k_Z < 1,2, то зубцовая зона мало использована или воздушный зазор взят слишком большим. В обоих случаях в расчет должны быть внесены соответствующие коррективы.

При дальнейшем расчете магнитной цепи определяют магнитные напряжения ярм статора и ротора.

9.9.4. *Магнитное напряжение ярм статора и ротора. Намагничивающий ток*

Магнитное напряжение ярма статора, А,

$$F_a = L_a H_a, \tag{9.116}$$

где L_a — длина средней магнитной силовой линии в ярме статора, м; H_a — напряженность поля при индукции B_a по кривой намагничивания для ярма, принятой при проектировании стали, А/м.

Индукция в ярме статора, Тл,

$$B_a = \Phi/(2h'_a\, l_{cm1} k_{c1}), \tag{9.117}$$

где h'_a — расчетная высота ярма статора, м:

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{П1} - \frac{2}{3} d_{k1} m_{k1} \tag{9.118}$$

где d_{k1} и m_{k1} — диаметр и число рядов аксиальных вентиляционных каналов в сердечнике статора; при отсутствии каналов $m_{k1} = 0$.

Длина средней магнитной силовой линии в ярме статора, м,

$$L_a = (D_a - h_a)/(2p), \tag{9.119}$$

где h_a — высота ярма статора, м:

$$h_a = (D_a - D)/2 - h_{п1}. \tag{9.120}$$

Магнитное напряжение ярма ротора, А,

$$F_j = L_j H_j \qquad (9.121)$$

где H_j — напряженность поля в ярме при индукции B_j по кривой намагничивания для ярма принятой при проектировании стали. Индукция в ярме ротора, Тл,

$$B_j = Ф / (2\, h'_j\, l_{ст2}\, k_{с2}), \qquad (9.122)$$

где $k_{с2}$ — коэффициент заполнения сталью ярма ротора (по табл. 9.13); h'_j — расчетная высота ярма ротора, м.

Для роторов с посадкой сердечника на втулку или на оребренный вал (крупные асинхронные двигатели) расчетная высота ярма статора (см. рис. 9.43), м,

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{П2} - \frac{2}{3} d_{k2} m_{k2}, \qquad (9.123)$$

В двигателях с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал внутренний диаметр ротора равен диаметру вала: $D_j = D_В$. В таких двигателях с 2p = 2 или 4 учитывают, что часть магнитных силовых линий потока замыкается через вал. Поэтому в двигателях с 2p = 2 расчетную высоту ярма ротора, м, определяют из выражения

$$h_j = \frac{2+p}{3{,}2p}\left(\frac{D_2}{2} - h_{П2}\right) - \frac{2}{3} d_{k2} m_{k2}, \qquad (9.124)$$

и длина силовых линий в ярме, м,

$$L_j = 2 h_j, \qquad (9.125)$$

где высота ярма ротора, м,

$$h_j = (D_2 - D_в) / 2 - h_{п2}. \qquad (9.126)$$

В двигателях с 2p = 4 с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал, имеющих размерные соотношения, при которых $0{,}75\left(\frac{D_2}{2} - h_{П2}\right) < D_в$, расчетную высоту ярма ротора определяют по (9.124), при других размерных соотношениях — по (9.126).

Длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора всех двигателей, кроме двухполюсных, с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал, м,

$$L_j = \pi(D_j + h_j) / (2p), \qquad (9.127)$$

где

$$h_j = (D_2 - D_j) / 2 - h_{па}.$$

На этом расчет магнитных напряжений участков магнитной цепи двигателя заканчивается. Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи (на пару полюсов), А,

$$F_ц = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j. \tag{9.128}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_\mu = F_ц / F_\delta. \tag{9.129}$$

Намагничивающий ток, А,

$$I_\mu \approx \frac{p F_ц}{0{,}9\, m_1 w_1 k_{ОБ1}}. \tag{9.130}$$

Намагничивающий ток выражается также в процентах или в долях номинального тока двигателя:

$$I^*_\mu \approx I_\mu / I_{НОМ}. \tag{9.131}$$

Относительное значение I^*_μ служит определенным критерием правильности произведенного выбора и расчета размеров и обмотки двигателя. Так, если при проектировании четырехполюсного двигателя средней мощности расчет показал, что $I^*_\mu < 0{,}20...0{,}18$, то в большинстве случаев это свидетельствует о том, что размеры машины выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Такой двигатель может иметь высокие КПД и cosφ, но плохие показатели расхода материалов на единицу мощности, большие массу и габариты.

Если же в аналогичном двигателе $I^*_\mu > 0{,}3...0{,}4$, то это в большинстве случаев означает, что либо его габариты взяты меньшими, чем следовало, либо неправильно выбраны размерные соотношения участков магнитопровода. Двигатель будет иметь низкие КПД и cosφ.

В небольших двигателях мощностью менее 2...3 кВт I^*_μ может достигать значения 0,5...0,6, несмотря на правильно выбранные размеры и малое насыщение магнитопровода. Это объясняется относительно большим значением магнитного напряжения воздушного зазора, характерным для двигателей малой мощности [6].

9.10. ПАРАМЕТРЫ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора r_1, x_1, ротора r_2, x_2 или приведенные к числу витков обмотки статора сопротивления ротора r'_2 и x'_2, сопротивление взаимной индуктивности x_{12} и расчетное сопротивление r_{12} (или r_μ), введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

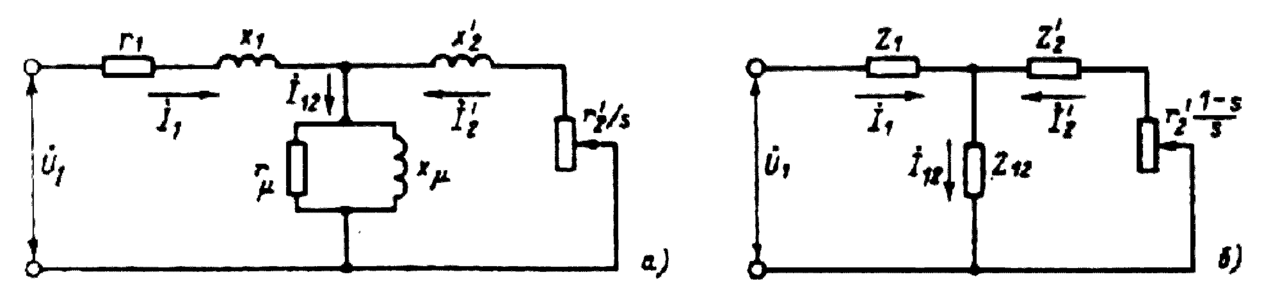


Рис. 9.47. Схемы замещения фазы обмотки приведенной асинхронной машины

Известные из общей теории электрических машин схемы замещения фазы асинхронной машины, основанные на приведении процессов во вращающейся машине к неподвижной, приведены на рис. 9.47. Физические процессы в асинхронной машине наглядно отражает схема, изображенная на рис. 9.47, а. Но для расчета оказалось удобнее преобразовать ее в схему, показанную на рис. 9.47, б.

Параметры схемы замещения не остаются неизменными при различных режимах работы машины. С увеличением нагрузки увеличивается поток рассеяния, и в связи с этим из-за возрастания насыщения отдельных участков магнитопровода полями рассеяния уменьшаются индуктивные сопротивления x_1 и x_2.

Увеличение скольжения в двигателях с короткозамкнутым ротором приводит к возрастанию действия эффекта вытеснения тока, что вызывает изменение сопротивлений обмотки ротора r_2 и x_2. При расчете рабочих режимов машины в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального эти изменения незначительны и ими обычно пренебрегают.

При расчете пусковых режимов, в которых токи машины в несколько раз превышают номинальный, а частота тока в роторе близка к частоте питающей сети, в большинстве случаев приходится учитывать изменение параметров от насыщения участков магнитопровода кода полями рассеяния и от влияния эффекта вытеснения тока.

9.10.1. Активные сопротивления обмоток статора и фазного ротора

Активные сопротивления r и r_2, Ом, определяют по основной расчетной формуле (5.1):

$$r \quad k_R \rho_v \frac{L}{q_{эф} a}, \tag{9.132}$$

где L — общая длина эффективных проводников фазы обмотки, м; $q_{эф}$ — площадь поперечного сечения эффективного проводника, м :

$$q_{эф} \quad q_{эл} n_{эл}; \tag{9.133}$$

$q_{эл}$ — площадь поперечного сечения элементарного проводника; $n_{эл}$ — число элементарных проводников в одном эффективном; a — число параллельных

ветвей обмотки; ρ_{υ} — удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре, Ом·м; k_R — коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока.

В проводниках обмотки статора асинхронных машин эффект вытеснения тока проявляется незначительно из-за малых размеров элементарных проводников. Поэтому в расчетах нормальных машин, как правило, принимают $k_R = 1$. Некоторое увеличение потерь, обусловленное действием эффекта вытеснения тока, относят к дополнительным потерям.

В обмотках фазных роторов k_R также принимают равным единице независимо от размеров и числа проводников в пазу, так как частота тока в них при номинальном и близких к нему режимах очень мала.

Общая длина проводников фазы обмотки L, м,

$$L = l_{ср}\, w, \tag{9.134}$$

где $l_{ср}$ — средняя длина витка обмотки, м; w — число витков фазы. Среднюю длину витка $l_{ср}$ находят как сумму прямолинейных пазовых и изогнутых лобовых частей катушки:

$$l_{ср} = 2\,(l_п + l_л). \tag{9.135}$$

Длина пазовой части $l_п$ равна конструктивной длине сердечников машины:

$$l_п = l_{1(2)}.$$

Лобовая часть катушки имеет сложную конфигурацию (рис. 9.48). Точные расчеты ее длины и длины вылета лобовой части требуют предварительного определения всех размеров катушки и сопряжены со значительными объемами расчетов, данные которых в дальнейшем электромагнитном расчете обычно не используются. Для машин малой и средней мощности и в большинстве случаев для крупных машин достаточно точные для практических расчетов результаты дают эмпирические формулы, учитывающие основные особенности конструктивных форм катушек.

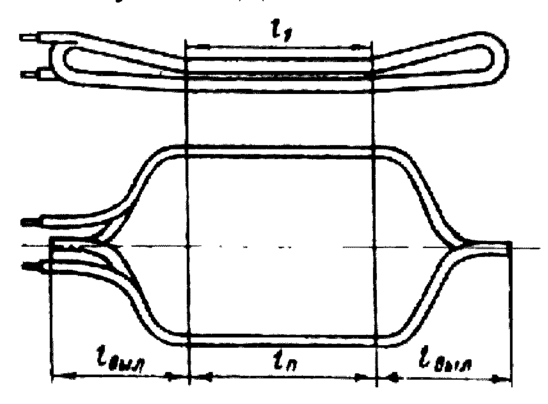


Рис. 9.48. Катушка двухслойной обмотки статора

Катушки всыпной обмотки статора. Длина лобовой части, м,

$$l_л = K_л\, b_{кт} + 2B; \tag{9.136}$$

вылет лобовых частей обмотки, м,

$$l_{выл} = K_л\, b_{кт} + B. \tag{9.137}$$

В этих формулах $b_{кт}$ — средняя ширина катушки, м, определяемая по окружности, проходящей по серединам высоты пазов:

$$b_{кт} = \frac{\pi(D + h_{П})}{2p}\beta, \qquad (9.138)$$

где $\beta = y_{расч} / \tau$ — укорочение шага обмотки статора. Для диаметральных двухслойных обмоток, выполненных без укорочения шага, и для двухслойных обмоток, включая обмотки из концентрических катушек, имеющих разную ширину, принимают $\beta = 1$; $К_л$ и $К_{выл}$ — коэффициенты, значения которых берут из табл. 9.23 в зависимости от числа полюсов машины и наличия изоляции в лобовых частях; В — длины вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части, м.

Таблица 9.23. К расчету размеров лобовых частей катушек всыпной обмотки

Число полюсов 2р	Катушки статора			
	Лобовые части не изолированы		Лобовые части изолированы лентой	
	Кл	Квыл	Кл	Лвыл
2	1,2	0,26	1,45	0,44
4	1,3	0,4	1,55	0,5
6	1,4	0,5	1,75	0,62
≥ 8	1,5	0,5	1,9	0,72

Для всыпной обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус, берут В = 0,01 м. В машинах, обмотки которых укладывают после запрессовки сердечника в корпус, вылет прямолинейной части В = 0,015 м.

Катушки из прямоугольного провода. В обмотках статоров и фазных роторов асинхронных двигателей, выполненных из прямоугольного провода, длина лобовой части витка, м,

$$l_л = К_л b_{кт} + 2B + h_п; \qquad (9.139)$$

вылет лобовой части обмотки (рис 9.49), м,

$$l_{выл} = К_л b_{кт} + B + 0{,}5 h_п, \qquad (9.140)$$

где $b_{кт}$, — средняя ширина катушки, для катушек статора рассчитывается по (9.138), для катушек ротора

$$b_{кт} = \frac{\pi(D_2 + h_{п2})}{2p}\beta, \qquad (9.141)$$

β — укорочение шага обмотки ротора; В — вылет прямолинейной части катушек из паза (по табл. 9.24); $К_л$, $К_{выл}$ — коэффициенты, определяемые из выражений

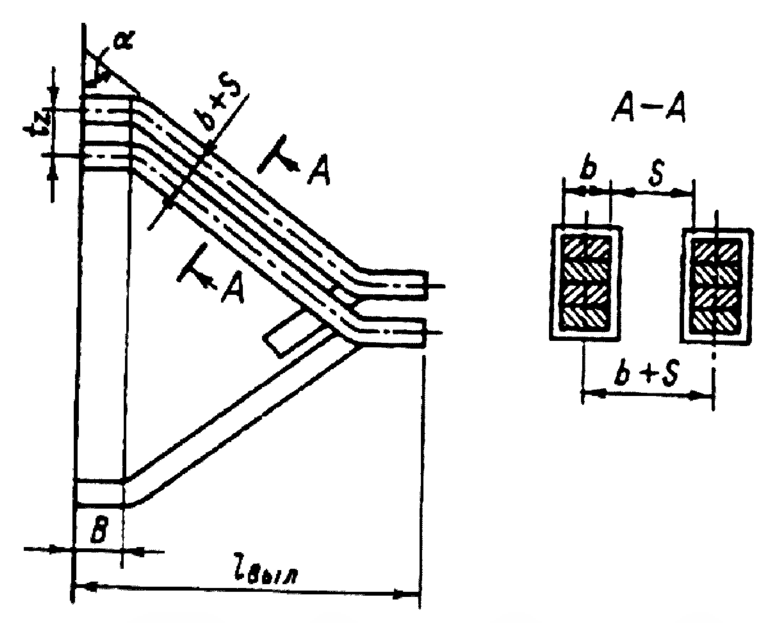


Рис. 9.49. Обозначения размеров катушек в лобовых частях

$$K_л = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}};\qquad (9.142)$$

$$K_{выл} = \frac{1}{2} K_л m,\qquad (9.143)$$

см. рис. 9.49.

Таблица 9.24. К расчету размеров лобовых частей катушек обмотки из прямоугольного провода

Напряжение U,В	S, 10^{-3}, м	B, 10^{-3}, м	Напряжение U, В	S, 10^{-3}, м	B, 10^{-3}, м
≤ 660	3,5	25	6000...6600	6...7	35...50
3000...3300	5...6	35...40	10000	7.. .8	60…65

Примечание. Меньшие значения для катушек с непрерывной изоляцией.

$$m = \sin\alpha = (b + S)/t_z;\qquad (9.144)$$

b — ширина меди катушки в лобовой части, м; S — допустимое расстояние между медью проводников соседних катушек (по табл. 9.24), м; t_z — зубцовое деление, м.

Стержневая волновая обмотка фазных роторов асинхронных двигателей. Длина лобовых частей стержня ротора, м,

$$l_л = K_л\, b_{кт} + 2B_c; \qquad (9.145)$$

вылет лобовой части, м,

$$l_{выл} = K_л\, b_{кт} + B_c, \qquad (9.146)$$

где $b_{кт}$ — среднее расстояние между сторонами последовательно соединенных стержней:

$$b_{кт} = (D_2 - h_{n2})\,/\,2p; \qquad (9.147)$$

B_c — сумма прямолинейных участков лобовой части стержня: длины вылета из паза и длины конца стержня в месте установки хомутиков, соединяющих стержни друг с другом. Обычно принимают 0,05...0,10 м (большие значения для машин большей мощности и напряжения). Для высоковольтных двигателей мощностью 800 - 1000 кВт и более берут B_c = 0,12...0,16 м.

Коэффициенты $K_л$ и $K_{выл}$ находят соответственно по формулам (9.142) и (9.143), в которых

$$m = (b_{cm} + S_{cm})\,/\,t_{z2}, \qquad (9.148)$$

где $S_{ст}$ — расстояние между медью соседних стержней в лобовых частях, м ($S_{ст}$ принимают в соответствии с табл. 9.25 в зависимости от напряжения на контактных кольцах ротора при неподвижной машине); $b_{ст}$ — ширина меди стержня ротора, м; t'_{Z2} — зубцовое деление по дну пазов ротора, м:

$$t'_{z2} = \pi(D_2 - 2\,h_{П2})\,/\,Z_2 \qquad (9.149)$$

Таблица 9.25. К расчету размеров лобовой части стержней фазных роторов асинхронных двигателей

$U_{к.к.}$, В	500	500...1000	1000.. .1500	1500.. .2000
Sст, 10^{-3} м	1,7	2	2,6	2,9

После расчета $l_п$ определяют среднюю длину витка по (9.135) и длину всех стержней фазы обмотки по (9.134).

Активное сопротивление фазы ротора r_2 определяют по (9.132). Дня дальнейших расчетов r_2 должно быть приведено к числу витков первичной обмотки

$$r'_2 = v_{12}\, r_2, \qquad (9.150)$$

где коэффициент приведения сопротивлений обмотки фазного ротора

$$v_{12} = \frac{m_1 (w_1 k_{ОБ1})^2}{m_2 (w_2 k_{ОБ2})^2} \qquad (9.151)$$

9.10.2. Индуктивные сопротивления обмоток двигателей с фазными роторами

Индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора двигателей с фазными роторами рассчитывают по формуле

$$x = 1{,}58\,\frac{f}{100}\left(\frac{w}{100}\right)^2\frac{l'_\delta}{pq}(\lambda_П + \lambda_Л + \lambda_Д), \tag{9.152}$$

здесь расчетная длина l'_δ при наличии радиальных вентиляционных каналов для обмотки статора

$$l'_\delta = l_1 - 0{,}5\,n_k b_k \tag{9.153}$$

и для обмотки ротора

$$l'_\delta = l_2 - 0{,}5\,n_k b_k \tag{9.154}$$

при отсутствии радиальных каналов в этих формулах $n_к = 0$.

Входящие в (9.152) коэффициенты магнитной проводимости $\lambda_п$, $\lambda_л$ и $\lambda_д$ обмоток определяют следующим образом.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния рассчитывают по формулам, приведенным в табл. 9.26, в зависимости от конфигурации паза и расположения в нем проводников обмотки (рис. 9.50). В этих формулах значения коэффициентов k_β и k'_β зависят от укорочения шага обмотки β, которое определяют по расчетному шагу обмотки (см. гл. 3) $\beta = y_{расч} / \tau$.

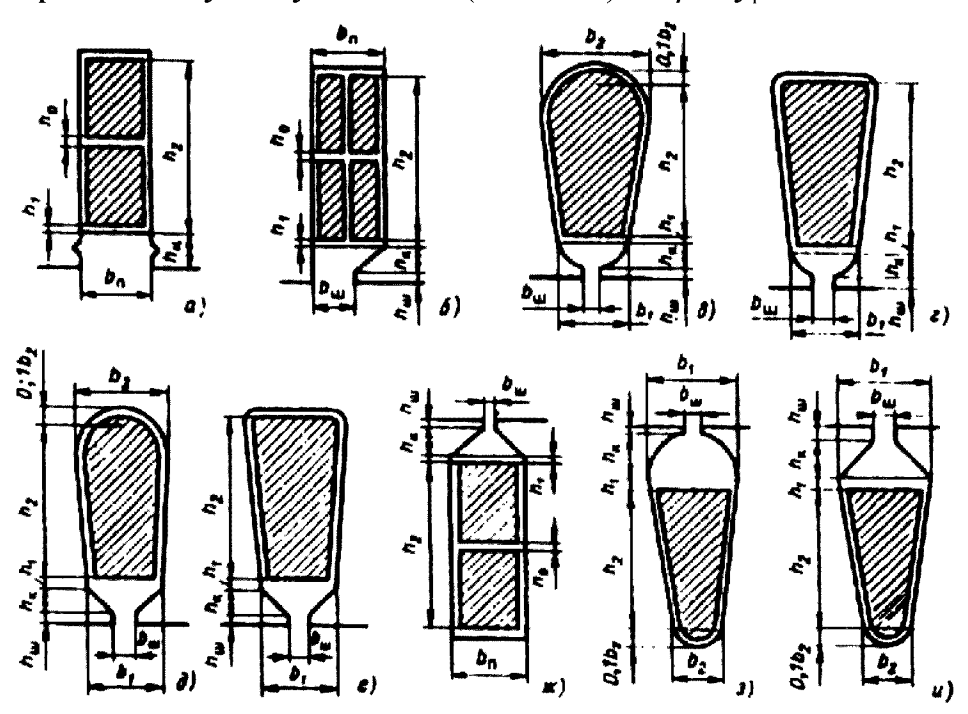


Рис. 9.50. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния фазных обмоток:
а—е — обмотки статора; ж—и — обмотки фазного ротора

Таблица 9.26. Расчетные формулы для определения коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния обмоток статора и фазного ротора асинхронных двигателей

Рисунок	Тип обмотки	Расчетные формулы
9.50, а	Двухслойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_П} k_\beta + \frac{h_k}{b_П} k_\beta + \frac{h_0}{4b_П}$
	Однослойная	$\frac{h_2}{3b_П} + \frac{h_k}{b_П}$
9.50, б	Двухслойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_П} k_\beta + (\frac{h_1}{b_П} + \frac{3h_k}{b_П + 2b_Ш} + \frac{h_Ш}{b_Ш}) k_\beta + \frac{h_0}{4b_П}$
9.50, в,г,з	Двухслойная и однослойная	$\frac{h_2}{3b_1} k_\beta + (0{,}785 - \frac{b_Ш}{2b_1} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_Ш}{b_Ш}) k_\beta$
9.50, д,е,и	То же	$\frac{h_2}{3b_1} k_\beta + (\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_k}{b_1 + 2b_Ш} + \frac{h_Ш}{b_Ш}) k_\beta$
9.50, ж	Двухслойная	$\frac{h_2 - h_0}{3b_П} k_\beta + (\frac{h_1}{b_П} + \frac{3h_k}{b_П + 2b_Ш} + \frac{h_Ш}{b_Ш}) k_\beta + \frac{h_0}{4b_П}$

При β = 1

$$k_\beta = k'_\beta = 1 \qquad (9.155)$$

При обмотке с укорочением 2/3 ≤ β≤ 1

$$k'_\beta = 0{,}25\,(1 + 3\beta); \qquad (9.156)$$

при укорочении 1/3 ≤ β ≤ 2/3

$$k'_\beta = 0{,}25\,(6\beta - 1). \qquad (9.157)$$

Коэффициент

$$k_\beta = 0{,}25\,(1 + 3\,k'_\beta). \qquad (9.158)$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_л = 0{,}34\,\frac{q}{l_\delta}(l_л - 0{,}64\,\beta\,\tau) \qquad (9.159)$$

где q и $l_л$ — число пазов на полюс и фазу и длина лобовой части витка обмотки; $\beta = y_{расч} / \tau$ — укорочение шага обмотки, для которой проводится расчет, т. е. обмотки статора или фазного ротора.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния для обмоток статора и фазного ротора

$$\lambda_Д = \frac{t_Z}{12\delta k_\delta}\xi. \qquad (9.160)$$

Значение коэффициента ξ зависит от числа q, укорочения шага обмотки и размерных соотношений зубцовых зон и воздушного зазора.

Ниже приводятся формулы, в которые при расчете ξ, для обмоток статора или ротора следует подставлять данные обмоток и зубцовых зон соответственно статора или ротора.

Для обмоток статора и ротора при q, выраженном целым числом ($q \geq 2$), для обмотки с $\beta = 1$

$$\xi = 2 + 0{,}022\,q^2 - k^2_{об}(1 + \Delta z); \qquad (9.161)$$

при укороченном шаге обмотки ($\beta < 1$)

$$\xi = k''q^2 + k'_\beta - k^2_{об}(1 + \Delta z); \qquad (9.162)$$

при дробном ($q \geq 2$)

$$\xi = k''q^2 + 2k''_\beta - k^2_{об}\left(\frac{1}{d^2} + \Delta z\right); \qquad (9.163)$$

при дробном q, значение которого $1 < q < 2$,

$$\xi = k''q^2 + 2k''_\beta \; \frac{k}{q} \; k^2_{об}\left(\frac{1}{d^2} + \Delta z\right); \qquad (9.164)$$

В этих формулах коэффициенты Δz, k', k'' и k''_β определяют по кривым, приведенным на рис. 9.51. Для определения k''_β и k' необходимо найти дробную часть числа q, равную c/d (дробное число $q = b +$ c/d, где b — целое число, c/d < 1 — дробная часть числа q), коэффициент k'_β — по (9.156) или (9.157).

Индуктивное сопротивление обмотки фазного ротора, определенное по (9.152), должно быть приведено к числу витков обмотки статора:

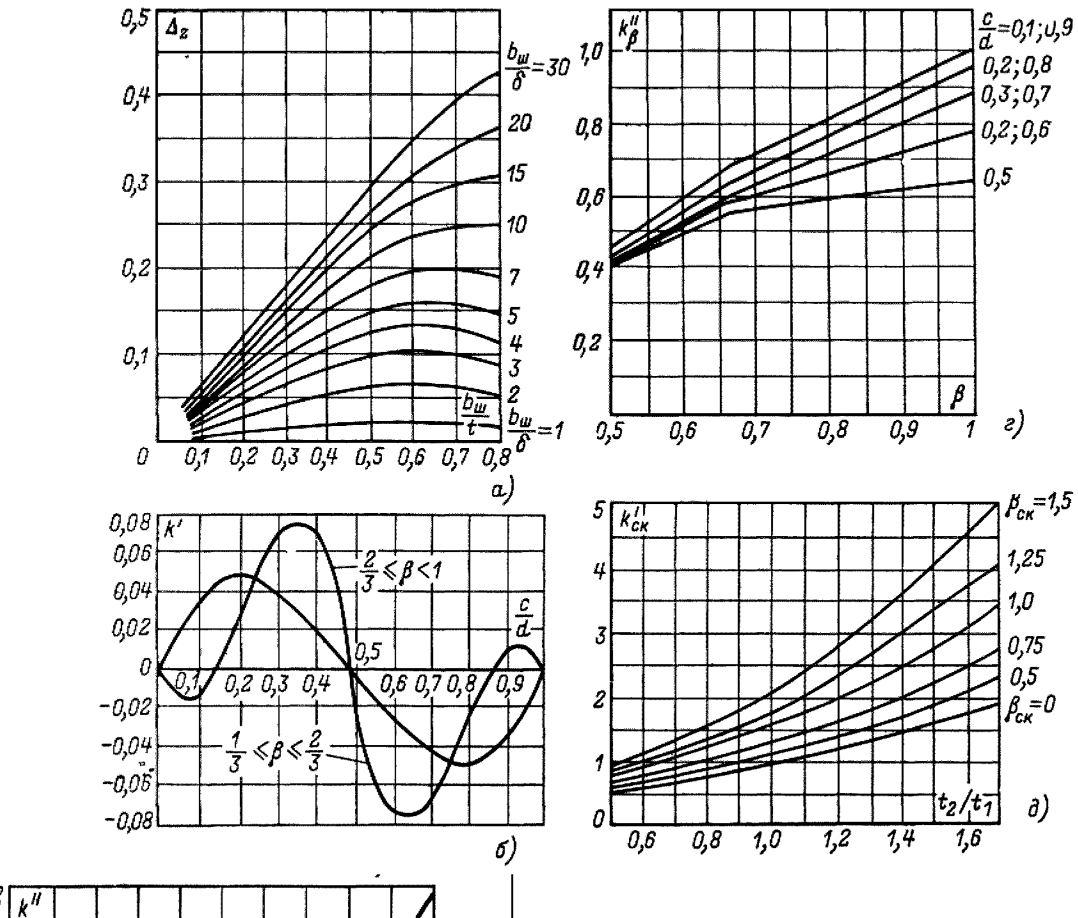
$$x'_2 = v_{12}\,x_2, \qquad (9.165)$$

где v_{12} — коэффициент приведения сопротивлений по (9.151).

9.10.3. Сопротивления обмоток двигателей с короткозамкнутыми роторами

Активное сопротивление фазы обмотки статора двигателя с короткозамкнутым ротором рассчитывается так же, как и для двигателя с фазным ротором.

Активное сопротивление фазы короткозамкнутого ротора определяется следующим образом. Как говорилось выше, за фазу обмотки, выполненной в виде беличьей клетки, принимают один стержень и два участка замыкающих колец (см. рис. 9,35). Токи в стержнях и замыкающих кольцах различны, поэтому их сопротивления при расчете общего сопротивления фазы должны быть приведены к одному току. Таким образом, сопротивление фазы короткозамкнутого ротора r_2 является расчетным параметром, полученным из условия равенства



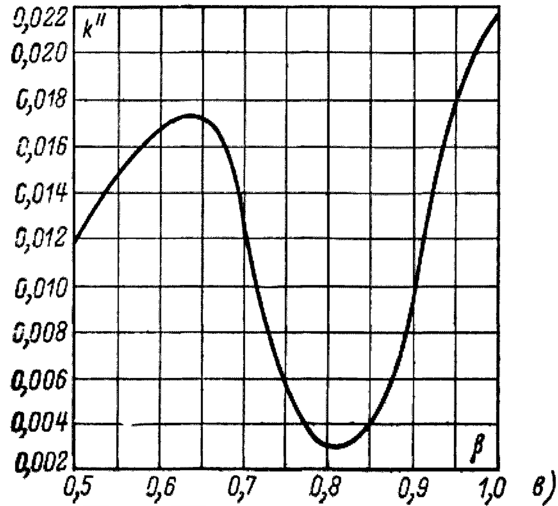


Рис. 9.51. Коэффициенты к расчету проводимости дифференциального рассеяния:
а — коэффициент Δz в зависимости от размерных соотношений $b_ш/t_z$ и $b_ш/S$;
б — коэффициент k' в зависимости от дробной части числа q;
в — коэффициент K’ в зависимости от укорочения шага обмотки β;
г — коэффициент $K''_β$ в зависимости от укорочения шага обмотки β и дробной части числа q;
д — коэффициент $k_{ск}$ в зависимости от соотношения t_{z2}/t_{z1} и относительного скоса пазов $β_{ck}$

электрических потерь в сопротивлении r_2 от тока I_2 и суммарных потерь в стержне и участках замыкающих колец соответственно от тока в стержне I_c и тока в замыкающем кольце $I_{кл}$ реальной машины:

$$I_2^2 r^2 = I_C^2 r = 2 I_{КЛ}^2 r_{КЛ} \qquad (9.166)$$

где I_c — ток в стержне ротора; $I_{кл}$ — ток в замыкающих кольцах; r_C — сопротивление стержня; $r_{кл}$ — сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями (см. рис. 9.35).

Ток I_c называют током ротора и в расчетах обозначают I_2.

Учитывая, что

$$I_{кл} = I_c/\Delta = I_2/\Delta, \tag{9.167}$$

где $\Delta = 2\sin\frac{\pi p}{Z_2}$ — (см. § 9.7), из (9.167), получаем

$$r_2 = r_c + 2\frac{r_{КЛ}}{\Delta^2} \tag{9.168}$$

где

$$r_c = \rho_C \frac{l_C}{q_C} k_r; \tag{9.169}$$

$$r_{кл} = \rho_{КЛ} \frac{\pi D_{КЛ.СР}}{Z_2 q_{КЛ}}. \tag{9.170}$$

В этих выражениях l_c – полная длина стержня, равная расстоянию между замыкающими кольцами, м; $D_{кл\cdot ср}$ – средний диаметр замыкающих колец, м (см. рис. 9.37):

$$D_{кл\cdot ср} = D_2 - h_{кл}; \tag{9.171}$$

q_c – сечение стержня, м^2; k_r – коэффициент увеличения активного сопротивления стержня от действия эффекта вытеснения тока; при расчете рабочих режимов в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинального для всех роторов принимают $k_r = 1$; $q_{кл}$ – площадь поперечного сечения замыкающего кольца, м^2; ρ_c и $\rho_{кл}$ – соответственно удельные сопротивления материала стержня и замыкающих колец, Ом·м, при расчетной температуре (см. табл. 5.1).

Сопротивление r_2 для дальнейших расчетов должно быть приведено к числу витков первичной обмотки. Выражение коэффициента приведения для сопротивления фазы короткозамкнутого ротора получают, подставляя в (9.151) значения $m_2 = Z_2$, $w_2 = 1/2$, $k_{об2} = 1$ и учитывая влияние скоса пазов:

$$\nu_{12} = 4m\frac{(w_1 k_{ОБ1})^2}{Z_2 k_{СК}^2}, \tag{9.172}$$

где коэффициент скоса пазов (по 3.17)

$$k_{ск} = 2\sin\frac{\gamma_{СК}}{2} / \gamma_{СК}; \qquad \gamma_{СК} = \pi\frac{2p}{Z_2}\beta_{СК}.$$

Обычно значения $\beta_{ск}$ выражают в долях зубцового деления ротора t_{z2}. При скосе пазов ротора на одно зубцовое деление статора $\gamma_{ck} = \pi 2p / Z_1$. В этом случае в двигателях с 2р = 2 из-за малости угла γ_{ck} принимают $k_{ск} = 1$.

Приведенное значение активного сопротивления фазы обмотки короткозамкнутого ротора

$$r'_2 = r_2 \nu_{12}. \tag{9.173}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором рассчитывается по той же формуле, что и для статора с фазными роторами, т. е.

$$x = 1{,}58\frac{f}{100}\left(\frac{w_1}{100}\right)^2\frac{l_\delta}{pq}(\lambda_П + \lambda_Л + \lambda_Д), \tag{9.174}$$

Входящий в формулу коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния $\lambda_п$ определяют в зависимости от конфигурации пазов по формулам табл. 9.26.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния $\lambda_л$ определяется по (9.159).

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния $\lambda_{д1}$ определяют по формуле

$$\lambda_Д = \frac{t_{Z1}}{12\delta k_\delta}\xi. \tag{9.174а}$$

в которой ξ, находят следующим образом.

При открытых пазах статора и отсутствии скоса статора или ротора

$$\xi = \left(2\frac{t_{Z2}}{t_{Z1}} - \frac{t_{Z1}}{t_{Z2}}\Delta_Z\right)k_\beta - k_{ОБ}^2\left(\frac{t_{Z2}}{t_{Z1}}\right)^2. \tag{9.175}$$

При полузакрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов

$$\xi = 2k_{СК}k_\beta - k_{ОБ}^2\left(\frac{t_{Z2}}{t_{Z1}}\right)^2(1 + \beta_{СК}^2). \tag{9.176}$$

В этих формулах t_{Z1} и t_{Z2} – зубцовые деления статора и ротора; Δ_Z определяют по кривой рис. 9.51, *а*, k_β определяют по (9.155) или (9.158); $\beta_{ск} = \beta_{ск}/t_{Z2}$ – скос пазов, выраженный в долях зубцового деления ротора. При отсутствии скоса пазов $b_{ск} = 0$; $k_{ск}$ определяют по кривым рис. 9.51, д в зависимости от t_{Z2}/t_{Z1} и $\beta_{ск}$ (при отсутствии скоса пазов – по кривой, соответствующей $\beta_{ск} = 0$).

Индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора определяют по формуле

$$x_2 = 7{,}9 f_1 l_\delta 10^{-6}(\lambda_П + \lambda_Л + \lambda_Д + \lambda_{СК}), \tag{9.177}$$

полученной после подстановки в (9.152) значений $m_2 = Z_2$ и $q_2 = 1/(2p)$ обмотки короткозамкнутого ротора и введения дополнительного слагаемого $\lambda_{ск}$.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора рассчитывают по приведенным в табл. 9.27 формулам в зависимости от конфигурации паза ротора (рис. 9.52).

Таблица 9.27. Расчетные формулы для определения коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутых роторов

Рисунок	Расчетные формулы
9.52, а	$\left[\frac{h_0}{3b_1}(1-\frac{\pi b_1^2}{8q_C})^2+0{,}66-\frac{b_Ш}{2b_1}\right]k_Д+\frac{h_Ш}{b_Ш}$
9.52,6	$(\frac{h_0}{3b_П}+\frac{3h_2}{b_П+2b_Ш})k_Д+\frac{h_Ш}{b_Ш}$
9.52, в	$\frac{h_0}{3b_П}k_Д+\frac{h_Ш}{b_Ш}$
9.52, г	$\left[\frac{h_0}{3b_1}(1-\frac{\pi b_1^2}{8q_C})^2+0{,}66-\frac{b_Ш}{2b_1}\right]k_Д+\frac{h_Ш}{b_Ш}$
9.52, д	$(0{,}785-\frac{b_Ш}{2d_П})k_Д+\frac{h_Ш}{h_П}$

При расчете номинального режима двигателя во всех формулах $k_д = 1$.

При закрытых пазах ротора любой конфигурации (рис. 9.52, а–д) в расчетных формулах табл. 9.27 нужно при шлицах по рис. 9.52, е слагаемые $h_ш/b_ш$ заменить на $0{,}3 + 1{,}12 \cdot 10^6 h_Ш/I_2$, по рис. 9.52, ж – на $h_ш/b_ш + 1{,}12 \cdot 10^6 h_Ш/I_2$, где $h_Ш$ – толщина ферромагнитной перемычки над пазом, м; I_2 – ток ротора, А.

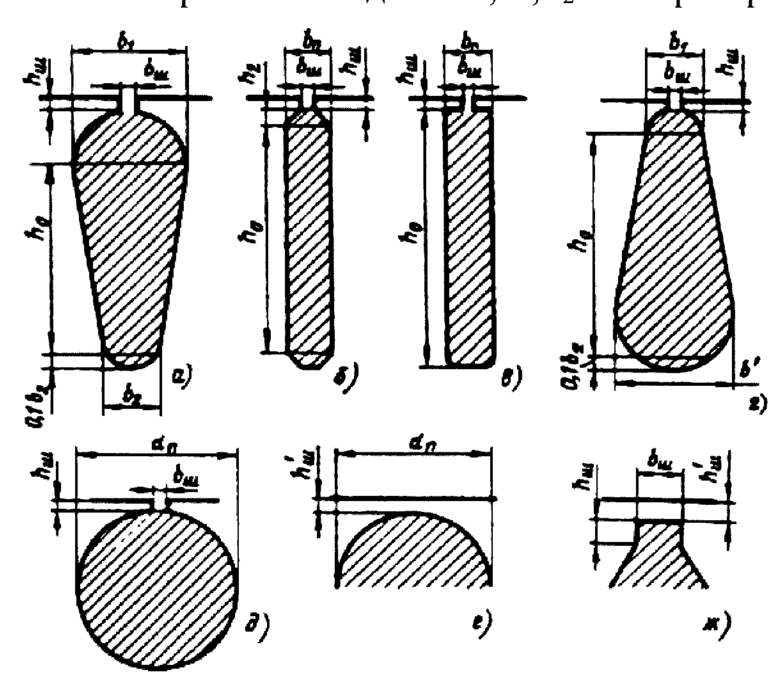


Рис. 9.52. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутых роторов:
а — д — полузакрытые пазы; е, ж — закрытые пазы

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния рассчитывают в зависимости от размеров и расположения замыкающих колец обмотки по следующим формулам.

В роторах с литыми обмотками при замыкающих кольцах, прилегающих к торцам сердечника ротора (см. рис. 9.37, б), используют формулу

$$\lambda_{Л2} = \frac{2{,}3 D_{КЛ.СР.}}{Z_2 l_\delta' \Delta^2} \lg \frac{4{,}7 D_{КЛ.СР}}{h_{КЛ} + 2b_{КЛ}}. \qquad (9.178)$$

Если замыкающие кольца отставлены от торцов ротора (см. рис. 9.37, *а*), как, например, в обмотке, выполненной из медных или латунных стержней, впаянных в замыкающие кольца, расчет проводят по формуле

$$\lambda_{Л2} = \frac{2{,}3 D_{КЛ.СР.}}{Z_2 l_\delta' \Delta^2} \lg \frac{4{,}7 D_{КЛ.СР}}{2(h_{КЛ} + b_{КЛ})}. \qquad (9.179)$$

В этих формулах $D_{кл.ср}$ — средний диаметр замыкающих колец по (9.171); $\Delta = 2 \sin \pi p / Z_2$ — коэффициент приведения токов в кольце к току в стержне; $h_{кл}$ и $b_{кл}$ — средние высота и ширина колец (см. рис. 9.37); l_δ; — по (9.154).

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки, короткозамкнутого ротора

$$\lambda_{Д2} = \frac{t_Z}{12\delta k_\delta}\xi. \qquad (9.180)$$

где

$$\xi = 1 + \frac{1}{5}\left(\frac{\pi \rho}{Z_2}\right)^2 - \frac{\Delta_Z}{1-(p/Z_2)^2} \qquad (9.181)$$

Δ_Z находят по кривым рис. 9.51, а.

Как видно из (9.181), при большом числе пазов ротора, приходящихся на пару полюсов: $Z_2/p \geq 10$, без заметной погрешности можно принять $\xi = 1$.

Коэффициент проводимости скоса, учитывающий влияние на ЭДС обмотки ротора скоса пазов,

$$\lambda_{СК} = (t_{Z2}\beta_{СК}^2)/(12 k_\delta k_\mu), \qquad (9.182)$$

где $\beta_{ск}$ — скос пазов, выраженный в зубцовых делениях ротора. При скосе пазов на одно зубцовое деление ротора $\beta_{ск} = 1$; k_μ — коэффициент насыщения магнитной цепи (по 9.129).

Приведенное к числу витков обмотки статора индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора

$$x_2' - x_2 \gamma_{12} \qquad (9.183)$$

где ν_{12} — по (9.172).

Сопротивление схемы замещения r_μ (см. рис. 9.47, а) является расчетным. Введением его в схему замещения учитывают влияние потерь в стали статора на процессы в асинхронной машине, поэтому значение сопротивления r_μ должно быть принято таким, чтобы выделяющаяся в нем активная мощность была равна мощности, затрачиваемой на потери в стали в реальной машине и отнесенной к одной фазе. Таким образом, $r_\mu = P_{CT}/(m\, I^2_{0a})$, так как активные потери в стали определяются активной составляющей тока холостого хода I_{0a}. Из схемы замещения $r_\mu = E_1^2 m_1 / P_{CT}$, где $\dot{E}_1 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1$.

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора x_μ по схеме замещения может быть определено как $x_\mu = E_1 \backslash I_\mu$.

В расчетной практике параллельное включение сопротивлений r_μ и x_μ оказалось удобнее заменить последовательно включенными сопротивлениями r_{12} и x_{12} (см. рис. 9.47, б), значения которых определяют из условия

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_\mu = \frac{jr_\mu x_\mu}{r_\mu + jx_\mu} = r_{12} + jx_{12},$$

откуда

$$r_{12} = \frac{x_\mu^2 r_\mu}{r_\mu^2 + x_\mu^2} \text{ и } x_{12} = \frac{r_\mu^2 x_\mu^2}{r_\mu^2 + x_\mu^2}$$

Так как в асинхронных машинах $r_\mu \le x_\mu$, то $x_{12} \approx x_\mu$, а $r_{12} << x_{12}$. В связи с этим значение r_1 не играет заметной роли при анализе процессов в машине, и в расчетах им часто пренебрегают.

Сопротивления r_1 и x_{12} с достаточной для обычных расчетов точностью определяют по следующим формулам:

$$r_{12} = P_{ст.осн} / (\mathrm{m}\, I^2_\mu)\ ; \qquad (9.184)$$

$$x_{12} = \frac{U_{1НОМ} - I_\mu x_1}{I_\mu} = \frac{U_{1ном}}{I_\mu} - x_1 \qquad (9.185)$$

9.10.4. Относительные значения параметров

Для удобства сопоставления параметров отдельных машин и упрощения расчета характеристик параметры асинхронных машин выражают в относительных единицах, принимая за базисные значения номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора.

Значения параметров, выраженные в относительных единицах, отмечают звездочкой:

$$\left.\begin{aligned}
&x_1 = x_1 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}}; r_{1*} = r_1 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}};\\
&x_{12*} = x_{12} \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}};\\
&x_{2*} = x_2 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}}; r_{2*} = r_2 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}};\\
&r_{12*} = r_{12} \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}}.
\end{aligned}\right\} \qquad (9.186)$$

Относительные значения одних и тех же параметров схемы замещения различных асинхронных двигателей нормального исполнении незначительно отличаются друг от друга.

Так, относительные значения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора большей частью находятся в пределах $x_1 = 0{,}08...0{,}14$ и $x'_2 = 0{,}1...0{,}16$.

Относительные значения сопротивлений взаимной, индукции, как правило, в 30–40 раз больше, чем x_{1*}. Обычно $x_{12*} = 2...4$.

Относительные значения активных сопротивлений обмотки статора и приведенного сопротивления обмотки ротора близки друг к другу и обычно составляют несколько сотых долей: $r_{1*} \approx r'_{2*} \approx 0{,}02...$ 0,03; лишь, в машинах малой мощности их значения несколько увеличиваются.

Сопротивление r_{12*} обычно составляет 0,05...0,2.

9.11. ПОТЕРИ И КПД

Потери в асинхронных машинах подразделяют на потери в стали (основные и добавочные), электрические, вентиляционные, механические и добавочные при нагрузке.

Основные потери в стали в асинхронных двигателях рассчитывают только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2 = s f_1$, в режимах, близких к номинальному, очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны [6].

В пусковых режимах f_2 близка к f_1 и потери в стали ротора соответственно возрастают, однако при расчете пусковых характеристик потери находят только для определения нагрева ротора за время пуска. Наибольшими потерями в пусковых режимах являются электрические потери в обмотках. Они во много раз превышают потери номинального режима, поэтому пренебрежение потерями в стали ротора при больших скольжениях не вносит сколько-нибудь заметной погрешности в расчет.

Основные потери в стали статоров асинхронных машин определяют в соответствии с (6.4) по следующей формуле:

$$P_{ст.осн} \quad p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 (k_{дa} B_a^2 m_a + k_{дz} B_{cp}^2 m_{z1}), \qquad (9.187)$$

где $p_{1,0/50}$ — удельные потери (табл. 9.28) при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц; β — показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания; для большинства электротехнических сталей β = 1,3...1,5; $k_{Дa}$ и $k_{ДZ}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов. Для машин мощностью меньше 250 кВт приближенно можно принять $k_{Дa}$ = 1,6 и $k_{Дz}$ = 1,8; для машин большей мощности $k_{Дa}$ = 1,4 и $k_{Дz}$ = 1,7; B_a и $B_{z1ср}$— индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл; m_a, m_{z1} – масса стали ярма и зубцов статора, кг:

$$m_a \quad \pi(D_a - h_a)\, h_a\, l_{cm1}\, k_{c1}\, \gamma_c\,; \qquad (9.188)$$

$$m_{z1} \quad h_{z1} b_{z1cp}\, Z_1\, l_{cm1}\, k_{c1}\, \gamma_c\,; \qquad (9.189)$$

h_a — высота ярма статора, м:

$$h_a = 0{,}5(D_a - D) \quad h_{n1}\,;$$

h_{z1} — расчетная высота зубца статора, м; b_{z1cp} — средняя ширина зубца статора, м:

$$b_{z1cp} = (b_{z1max} + b_{z1min})/2\,;$$

γ_c — удельная масса стали; в расчетах принимают $\gamma_c = 7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3.

Таблица 9.28. Удельные потери в стали, Вт/кг, толщиной 0,5 мм при индукции B = 1 Тл и частоте перемагничивания f = 50 Гц

Марка стали	Удельные потери, Вт/кг	Марка стали	Удельные потери, Вт/кг
2013	2,5	2312	1,75
2212	2,2	2412	1,3
2214	2		

Добавочные потери в стали (добавочные потери холостого хода) подразделяют на поверхностные (потери в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсаций индукции в воздушном зазоре) и пульсационные потери в стали зубцов (от пульсации индукции в зубцах).

Для определения поверхностных потерь вначале находят амплитуду пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов статора и ротора (рис. 9.53, а), Тл:

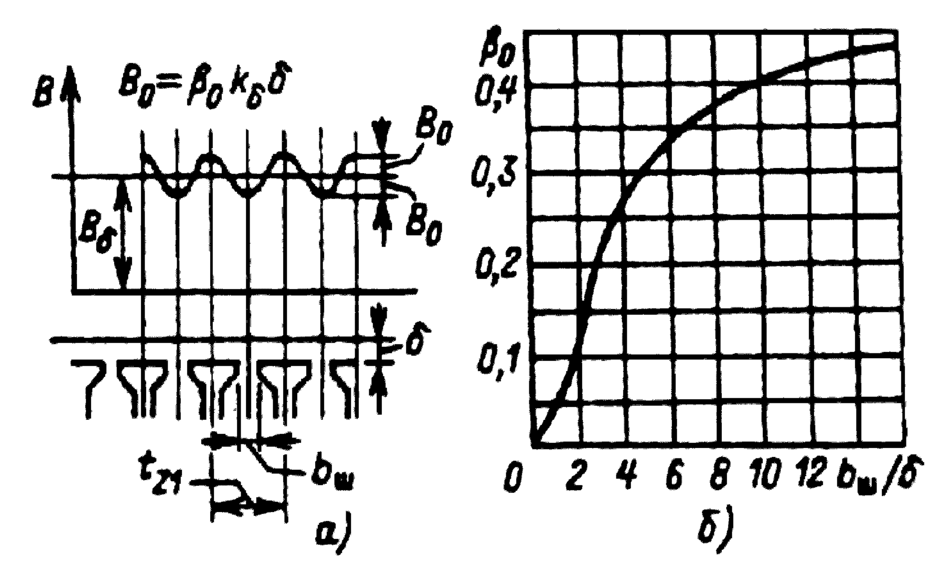


Рис. 9.53. К расчету поверхностных потерь в асинхронных машинах:
а — пульсация индукции в воздушном зазоре;
б — зависимость $\beta_0 = f/(b_ш / S)$

$$B_{01(2)} = \beta_{01(2)} k_\delta B_\delta. \qquad (9.190)$$

Для зубцов статора β_{01} зависит от отношения ширины шлица пазов ротора к воздушному зазору: $\beta_{01} = f(b_{ш2} / \delta)$; для зубцов ротора — от отношения ширины шлица пазов статора к воздушному зазору: $\beta_{02} = f(b_{ш1} / \delta)$. Зависимость $\beta_0 = f(b_ш / \delta)$ приведена на рис. 9.53, б.

По B_0 и частоте пульсаций индукции над зубцами, равной $Z_2 n$ для статора и $Z_1 n$ для ротора, рассчитывают удельные поверхностные потери, т. е. потери, приходящиеся на 1м^2 поверхности головок статора и ротора:

для статора

$$P_{пов1} = 0,5 k_{01} \left(\frac{Z_2 n}{10000}\right)^{1,5} (B_{0,1} t_{z2} \cdot 10^3)^2; \qquad (9.191)$$

для ротора

$$P_{пов2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10000}\right)^{1,5} (B_{0,2} t_{z1} \cdot 10^3)^2; \qquad (9.192)$$

В этих выражениях $k_{01(02)}$ – коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов статора (ротора) на удельные потери; если поверхность не обрабатывается (двигатели мощностью до 160 кВт, сердечники статоров которых шихтуют на цилиндрические оправки), то $k_{01(02)} = 1,4...1,8$, при шлифованных поверхностях (наружная поверхность роторов машин средней и большой мощности и внутренняя поверхность статора двигателей $P_2 > 160$ кВт) $k_{01(02)} = 1,7...2,0$; $n = n_c (1 - s) \approx n_c$ — частота вращения двигателя, об/мин.

Полные поверхностные потери статора, Вт,

$$P_{пов.1} = p_{пов.1} (t_{z1} - b_{ш1}) Z_1 l_{cm1}. \qquad (9.193)$$

Полные поверхностные потери ротора, Вт,

$$P_{пов2}\quad p_{пов2}(t_{z2} - b_{ш2})Z_2\, l_{ст2}. \qquad (9.194)$$

Для определения пульсационных потерь вначале находится амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов $B_{пул}$, Тл:

для зубцов статора

$$B_{пул1} = \frac{\gamma_2 \delta}{2t_{z1}} B_{z1ср}; \qquad (9.195)$$

для зубцов ротора

$$B_{пул2} = \frac{\gamma 1 \delta}{2t_{z2}} B_{z2ср}. \qquad (9.196)$$

В этих формулах $B_{z1ср}$ и $B_{z2ср}$ — средние индукции в зубцах статора и ротора, Тл:

$$\left.\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5 + b_{ш1}/\delta}; \\ \gamma_2 &= \frac{(b_{ш2}/\delta)^2}{5 + b_{ш2}/\delta}. \end{aligned}\right\} \qquad (9.197)$$

При открытых пазах на статоре или на роторе при определении γ_1 и γ_2 в (9.197) вместо $b_{ш1}$ или $b_{ш2}$ подставляют расчетную ширину раскрытия паза, равную:

$$b'_{ш1(2)} = \frac{b_{ш1(2)}}{3}\left(1 + \frac{0{,}5t_{z1(2)}}{t_{z1(2)} b_{ш1(2)} + k_\delta}\right) \qquad (9.198)$$

(индекс 1 при расчете $b'_{ш1}$, индекс 2 при расчете $b'_{ш2}$).

Значения коэффициента k_δ в зависимости от отношения $\delta_п/\delta$ для открытых пазов приведены на рис. 9.54.

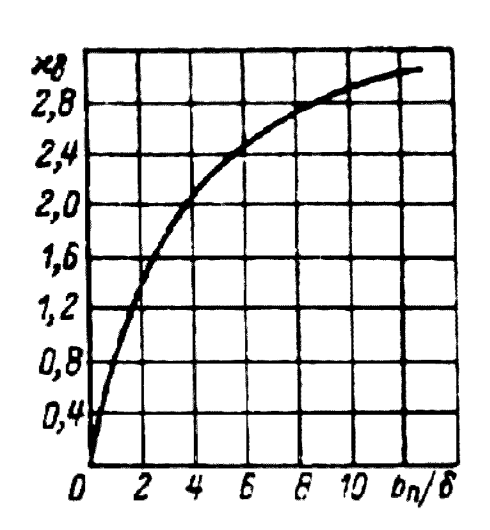


Рис. 9.54. К расчету пульсационных потерь в асинхронных машинах

Пульсационные потери в зубцах статора

$$P_{пул1} \approx 0{,}11\left(\frac{Z_2 n}{1000} B_{пул1}\right)^2 m_{z1}; \qquad (9.199)$$

пульсационные потери в зубцах ротора

$$P_{пул2} \approx 0{,}11\left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{пул2}\right)^2 m_{z2}; \qquad (9.200)$$

В этих формулах m_{z1} — масса стали зубцов статора, кг, определяется по (9.189); m_{z2} — масса стали зубцов ротора, кг:

$$m_{z2}\quad Z_2\, h_{z2}\, b_{z2ср}\, l_{ст2}\, k_{c2}\, \gamma_c \qquad (9.201)$$

где h_{z2} – расчетная высота зубца ротора, м; $b_{z2ср}$ – средняя ширина зубца ротора, м:

$$b_{z2cp} = (b_{z2max} + b_{z2min}) / 2.$$

Поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с и короткозамкнутыми или фазными роторами со стержневой обмоткой обычно малы, так как в пазах таких роторов $b_{ш2}$ мало и пульсации индукции в воздушном зазоре над головками зубцов статора незначительны. Поэтому расчет этих потерь в статорах таких двигателей не проводят.

В общем случае добавочные потери в стали

$$P_{ст доб} = P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2} \tag{9.202}$$

и полные потери в стали асинхронных двигателей

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб}. \tag{9.203}$$

Обычно $P_{ст.доб}$ приблизительно в 5—8 раз меньше, чем $P_{ст.осн}$.

Электрические потерн в асинхронных двигателях рассчитывают раздельно в обмотках статоров и роторов.

Электрические потери во всех фазах обмотки статора, Вт,

$$P_{э1} = m_1 I_1^2 r_1. \tag{9.204}$$

Электрические потери во всех фазах обмотки фазного ротора, Вт,

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_1'^2 r_2'. \tag{9.205}$$

Электрические потери в обмотке короткозамкнутого ротора, Вт,

$$P_{э2} = m_2 I_2^2 r_2 = Z_2 I_2^2 r_2 \tag{9.206}$$

или

$$P_{э2} = m_1 I_1'^2 r_2'. \tag{9.207}$$

Электрические потери в щеточном контакте $P_{э.щ}$, Вт, фазных роторов асинхронных двигателей, не имеющих приспособлений для подъема щеток и замыкания накоротко контактных колец при номинальном режиме работы,

$$P_{э.щ} = m_2 \Delta U_{щ} I_{к.к}, \tag{9.208}$$

где $\Delta U_{щ}$ — падение напряжения в скользящем контакте щетка — кольцо, В; принимается в зависимости от марки щеток по табл. П 4.2; $I_{к.к}$ — ток в кольце, А; при соединении обмотки ротора в звезду $I_{к.к} = I_2$; при соединении обмотки ротора в треугольник (при $m_2 = 3$) $I_{к.к} = \sqrt{3} I_2$.

Механические и вентиляционные потери в асинхронных двигателях рассчитывают по приближенным формулам, полученным из опыта проектирования и эксплуатации двигателей. Коэффициент трения ($К_т$) учитывает конструкцию, скорость вращения, число пар полюсов, мощность

двигателя. Его размерность изменяется в зависимости от вида формулы для определения $P_{мех}$ (9.209 – 9.213).

Потери на трение в подшипниках и вентиляционные потери в двигателях с радиальной системой вентиляции без радиальных вентиляционных каналов, с короткозамкнутым ротором и вентиляционными лопатками на замыкающих кольцах, Вт,

$$P_{мех} \approx K_т (n/1000)^2 (10D)^3; \qquad (9.209)$$

$K_т = 5$ при $2p = 2$; $K_т = 6$ при $2p \geq 4$ для двигателей с $D_a \leq 0{,}25$ м;
$K_т = 6$ при $2p = 2$; $K_т = 7$ при $2p \geq 4$ для двигателей с $D_a > 0{,}25$ м.
В двигателей с двигателях с внешним обдувом ($0{,}1 \leq D_a \leq 0{,}5$ м)

$$P_{мех} \quad K_т (n/10)^2 D^4_a; \qquad (9.210)$$

$K_т = 1$ для двигателей с $2p = 2$ и $K_т = 1{,}3(1 - D_a)$ при $2p \geq 4$.

В двигателях с радиальной системой вентиляции средней и большой мощности

$$P_{мех} \quad 1{,}2 \cdot 2p\,\tau^3 (n_к + 1{,}1) \cdot 10^3 \qquad (9.211)$$

где $n_к$ — число радиальных вентиляционных каналов; при отсутствии радиальных каналов $n_к = 0$.

В двигателях с аксиальной системой вентиляции

$$P_{мех} \quad K_т (n/1000)^2 (10\,D_{вент})^3, \qquad (9.212)$$

где $D_{вент}$ — наружный диаметр вентилятора, м; в большинстве конструкций можно принять $D_{вент} \approx D_a$; $K_т = 2{,}9$ для двигателей с $D_a \leq 0{,}25$ м; $K_т = 3{,}6$ для двигателей с $D_a = 0{,}25...0{,}5$ м.

В двигателях большой мощности ($0{,}5 < D_a < 0{,}9$ м)

$$P_{мех} \quad K_т (10D_a)^3 \qquad (9.213)$$

В этом выражении коэффициент $K_т$ принимается по табл. 9.29.

Таблица 9.29. **К расчету механических потерь двигателей большой мощности**

2p	2	4	6	8	10	12
Кт	3,65	1,5	0,7	0,35	0,2	0,2

Потери на трение щеток о контактные кольца, Вт, рассчитывают для двигателей с фазными роторами при отсутствии приспособлений для подъема щеток и закорачивания контактных колец в номинальном режиме работы:

$$P_{тр.щ} = K_{тр}\,\rho_щ\,S_щ\,v_к, \qquad (9.214)$$

где $K_{тр}$ — коэффициент трения щеток о контактные кольца (обычно принимается равным 0,16—0,17); $\rho_щ$ — давление на контактной поверхности щеток, кПа (см.

табл. П 4.2); $S_щ$ — общая площадь контактной поверхности всех щеток, м^2; $v_к$ – линейная скорость поверхности контактных колец, м/с.

Добавочные потери при нагрузке асинхронных двигателей возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора и ряда других причин. В короткозамкнутых роторах, кроме того, возникают потери от поперечных токов, т. е. токов между стержнями, замыкающихся через листы сердечника ротора. Эти токи особенно заметны при скошенных пазах ротора. В таких двигателях, как показывает опыт эксплуатации, добавочные потери при нагрузке могут достигать 1...2 % (а в некоторых случаях даже больше) от подводимой мощности. ГОСТ устанавливает редкие расчетные добавочные потери при номинальной нагрузке, равные 0,5 % номинальной потребляемой мощности. При расчетах потерь и КПД двигателей в режимах, отличных от номинального, значение добавочных потерь пересчитывают пропорционально квадрату токов:

$$P_{доб} = P_{доб.ном}(I_1/I_{1ном})^2. \tag{9.215}$$

Коэффициент полезного действия двигателя

$$\eta = P_2/P_1 = 1 - \sum P/P_1, \tag{9.216}$$

где $\sum P$ — сумма всех потерь в двигателе, Вт.

Ток холостого хода двигателя

$$I_{x.x} = \sqrt{I^2_{x.x.a} + I^2_{x.x.p}} \tag{9.217}$$

При определении активной составляющей тока холостого хода принимают, что потери на трение и вентиляцию и потери в стали при холостом ходе двигателя такие же, как и при номинальном режиме. При этом условии

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{э1x.x}}{mU_{1ном}} \tag{9.218}$$

Электрические потери в статоре при холостом ходе приближенно принимаются равными:

$$P_{э1x.x} = m\,I^2_{\mu}\,r_1. \tag{9.219}$$

Реактивная составляющая тока холостого хода

$$I_{x.x.p} \approx I_{\mu} \tag{9.220}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_{x.x} = I_{x.x.a}/I_{x.x.} \tag{9.221}$$

9.12. РАСЧЕТ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости P_1, I_1, cosφ, η, $s_1 = f(P_2)$. Часто к ним относят также зависимости $M = f(P_2)$ и I_2 или $I_2 = (P_2)$ [6].

Методы расчета характеристик базируются на системе уравнений токов и напряжений асинхронной машины, которой соответствует Г-образная схема замещения (рис. 9.55). Г-образная схема получена из Т-образной схемы замещения (см. рис. 9.47), в которой ветвь, содержащая параметр Z_{12}, вынесена на вход схемы. Т-образная и Г-образная схемы идентичны для данной конкретной ЭДС, для которой рассчитывают комплексный коэффициент $\dot{c}_1$, равный взятому с обратным знаком отношению вектора напряжения фазы $\dot{U}_1$ к вектору ЭДС – $\dot{E}_1$

В асинхронных двигателях при изменении тока от синхронного холостого хода до номинального $\dot{E}_1$ изменяется незначительно. Поэтому для получения рабочих характеристик коэффициент $\dot{c}_1$, рассчитывают для синхронного холостого хода и принимают его значение неизменным. Это не вносит заметных погрешностей в расчет характеристик, так как значение коэффициента $\dot{c}_1$, во всем диапазоне изменения нагрузки от $P_2 = 0$ до $P_2 = P_{2ном}$ изменяется лишь в третьем или четвертом знаке.

Корректировку коэффициента $\dot{c}_1$, обычно производят лишь при расчете пусковых характеристик или режимов работы двигателя с большими скольжениями, при которых ток статора существенно превышает номинальный. Для расчета рабочих характеристик коэффициент определяют из выражения

$$\dot{c}_1 = \frac{Z_1 + Z_{12}}{Z_{12}} = 1 + \frac{Z_1}{Z_{12}} = c_1 e^{j\gamma},$$

Рис. 9.55. Г-образная схема замещения асинхронной машины (а) и соответствующая ей векторная диаграмма (б)

где

$$\gamma = arctg\frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_2)}. \qquad (9.222)$$

В асинхронных двигателях мощностью более 2 — 3 кВт, как правило, | γ | ≤ 1°, поэтому реактивной составляющей коэффициента c_1, можно пренебречь, тогда приближенно

$$\dot{c}_1 \approx c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}}. \qquad (9.223)$$

При более точных расчетах определяют и активную, и реактивную составляющие c_1 по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned} c_{1a} &= \frac{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})_1}{r_{12}^2 + x_{12}^2} \\ c_{1p} &= \frac{x_1 r_{12} - r_1 x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} \end{aligned}\right\} \qquad (9.224)$$

Полное значение

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1p}^2} \qquad (9.225)$$

Как видно, выражение (9.223) может быть получено из (9.225) при условии r_{12} << x_{12} и r_1 << x_{12}, что практически всегда имеет место в асинхронных машинах мощностью $P_2 \geq 2...3$ кВт. При этих же условиях $c_{1p} \approx 0$ и $c_{1a} = c_1$.

Рабочие характеристики можно рассчитать по круговой диаграмме или аналитическим методом. Расчет по круговой диаграмме более нагляден, но менее точен, так как требует графических построений, снижающих точность расчета. Аналитический метод более универсален, позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях и может быть легко переведен на язык программ при использовании в расчетах ЭВМ.

Аналитический метод расчета. В настоящее время практически все расчеты проводят аналитическим методом. Формулы для расчета рабочих характеристик приведены в табл. 9.28 в удобной для ручного счета последовательности. Расчет характеристик проводят, задаваясь значениями скольжений в диапазоне $s \approx (0{,}2...1{,}5)\ s_{ном}$. Номинальное скольжение можно предварительно взять при $s_{ном} \approx r_2'$. Для построения характеристик достаточно рассчитать значения требуемых величин для пяти - шести различных скольжений, выбранных в указанном диапазоне примерно через равные интервалы (см. пример расчета).

Перед началом расчета рекомендуется выписать значения постоянных, не зависящих от скольжения величин, как это показано в формуляре и в примере

расчета. К таким величинам относятся номинальное напряжение фазы $U_{1ном}$, сопротивления r_1 и r_2, сумма потерь $P_{ст} + P_{мех}$ (для двигателей с фазным ротором также $P_{тр.щ}$) и составляющие тока синхронного холостого хода: реактивная $I_{0р} \approx I_{\mu}$ и активная, которую определяют из выражения

$$I_{0a} = \frac{P_{CT.OCH} + 3 I_{\mu}^2 r_1}{3U_{1HOM}}, \qquad (9.226)$$

Выписывается также значение коэффициента c_1, определенное по (9.223) или по (9.225), и расчетные величины, обозначенные в формуляре *a, a', b и b'*. Формулы для их определения зависят от принятого (точного или приближенного) метода расчета c_1.

Если $|y| \leq 1°$, то можно использовать приближенный метод, так как в этом случае $c_{1p} \approx 0$ и $c_1 \approx 1 + x_1/x_{12}$. Тогда

$$\left.\begin{aligned} a &= c_1; \quad a = c_1 r_1; \\ b &= 0 \quad b = c_1(x_1 + c_1 x_2). \end{aligned}\right\} \qquad (9.227)$$

Если же расчет c_1 проводить по уточненным формулам (9.224) и (9.225), то

$$\left.\begin{aligned} a &= c_{1a}^2 - c_{1p}^2; \quad a = c_{1a} r_{1p} x_1 - b x_2; \\ b &= 2 c_{1a}; \quad b = c_{1a} x_1 + c_{1p} r_1 + a x_2. \end{aligned}\right\} \qquad (9.228)$$

Расчет характеристик рекомендуется проводить в следующей последовательности.

Вначале находят активную и реактивную составляющие комплексного сопротивления правой ветви схемы замещения (см. рис. 9.55):

$$Z_{ВЕТВИ} = c_1(r_1 + jx_1) + j\, c_1^2 x_2 + c_1^2 \frac{r_2}{s}, \qquad (9.229)$$

где

$$\left.\begin{aligned} R &= c_1 r_1 + c_1^2 \frac{r_2}{s} \\ X &= c_1 x_1 + c_1^2 x_2^2. \end{aligned}\right\} \qquad (9.229а)$$

Из (9.229) с учетом (9.227) или (9.228) получают

$$R = a' \frac{r_2}{s} + a, \qquad (9.230)$$

$$X = b; \qquad (9.231)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \qquad (9.232)$$

Далее находят (см. рис. 9.55)

$$I_2 = \frac{U_{1ном}}{Z}, \qquad \cos\varphi_2 = R/Z \qquad \text{и} \qquad \sin\varphi_2 = X/Z$$

Составляющие тока статора являются суммами активных и реактивных составляющих токов параллельных ветвей схемы замещения:

$$\left. \begin{aligned} I_{1a} &= I_{01} + I_2 \cos\varphi_2; \\ I_{1p} &= I_{0p} + I_2 \sin\varphi_2. \end{aligned} \right\} \tag{9.233}$$

Полный ток статора

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}. \tag{9.234}$$

Приведенный ток ротора

$$I_2 = c_1 I_2 \cdot . \tag{9.235}$$

Ход последующих расчетов ясен из приведенных формул в формуляре (табл. 9.30).

Таблица 9.30. Формуляр расчета рабочих характеристик асинхронных двигателей

$P_{ном}$ =…; 2p =…; $U_{1ном}$ =….В; $I_{1ном}$ =…А; I_{0a} =…А;
$I_{0p} \approx I_\mu$ =…А; $P_{ст} + P_{тр.щ.} + P_{мех}$ =…кВт;
$P_{э.щ.ном}$ = …кВт: r_1 =…Ом; r'_2 =…Ом; c_1 =…
a' =…; a = …Ом; b' =…Ом; b =…Ом

№ п/п	Расчетная формула	Единицы величины			Скольжение		
			0,005	0,01	0,015	…	$s_{ном}$
1	$a r_2 / s$	Ом					
2	$b r_2 / s$	Ом					
3	$R \quad a + a r_2 / s$	Ом					
4	$X = b + b r_2 / s$	Ом					
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом					
6	$I^2 = U_{1ном} / Z$	А					
7	$\cos\varphi_2 = R/Z$	-					
8	$\sin\varphi_2 = X/Z$	-					
9	$I_{1a} = I_{0a} + I_2 \cos\varphi_2$	А					
10	$I_{1p} = I_{0p} + I_2 \sin\varphi_2$	А					

11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А					
12	$I_2 = c_1 I_2$	А					
13	$P_1 = 3\ U_{1ном}\ I_{1a}\ 10^{-3}$	кВт					
14	$P_{э1} = 3\ I_1^2\ r_1\ 10^{-3}$	кВт					
15	$P_{э1} = 3\ (I_1^1)^2\ r'_2\ 10^{-3}$	кВт					
16	$P_{э.щ.} \approx P_{э.щ.ном.}\ (I_1/I_{1ном})^*$	кВт					
17	$P_{доб} = 0{,}005\ P_1$	кВт					
18	$\Sigma P = P_{ст} + P_{мех} + P_{тр.щ} + P_{э1} + P_{э2} + P_{э.щ} + P_{доб}$	кВт					
19	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт					
20	$\eta = 1 - \Sigma P / P$	—					
21	$\cos\varphi = I_{1a} / I_1$	—					

*Для двигателей с короткозамкнутым ротором $P_{э.щ.ном} = 0$.

После окончания расчета для принятых значений скольжения строится характеристика $s = f(P_2)$, по которой уточняется значение $s_{ном}$, соответствующее заданной номинальной мощности $P_{2ном}$ (см. пример расчета на рис. 9.77), и заполняется последний столбец формуляра.

В приведенных формулах не учтено возможное изменение параметров при $s > s_{ном}$. Поэтому при расчете характеристик двигателей с двухклеточными короткозамкнутыми роторами или с роторами, имеющими фигурные пазы, в которых в повышенной степени проявляется действие эффекта вытеснения тока, для каждого из принятых значений скольжения, больших $s_{ном}$, необходимо уточнять значения параметров r'_2 и x'_2 (см. § 9.13).

Рабочие характеристики асинхронного двигателя мощностью 15 кВт приведены в примере расчета (см. § 9.17).

Расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме. Круговая диаграмма асинхронного двигателя изображена на рис. 9.56 [5]. Исходными данными для ее построения являются:

ток синхронного холостого хода I_0, А,

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} \tag{9.236}$$

где I_{0a} – по (9.266); $I_{0p} \approx I_\mu$

Коэффициент c_1 рассчитывают по (9.223) или по (9.225).

Сопротивления короткого замыкания

$$\left.\begin{aligned} x_{к1} &= x_1 + c_1 x_2; \\ r_{к1} &= r_1 + c_1 r_2 \end{aligned}\right\} \tag{9.237}$$

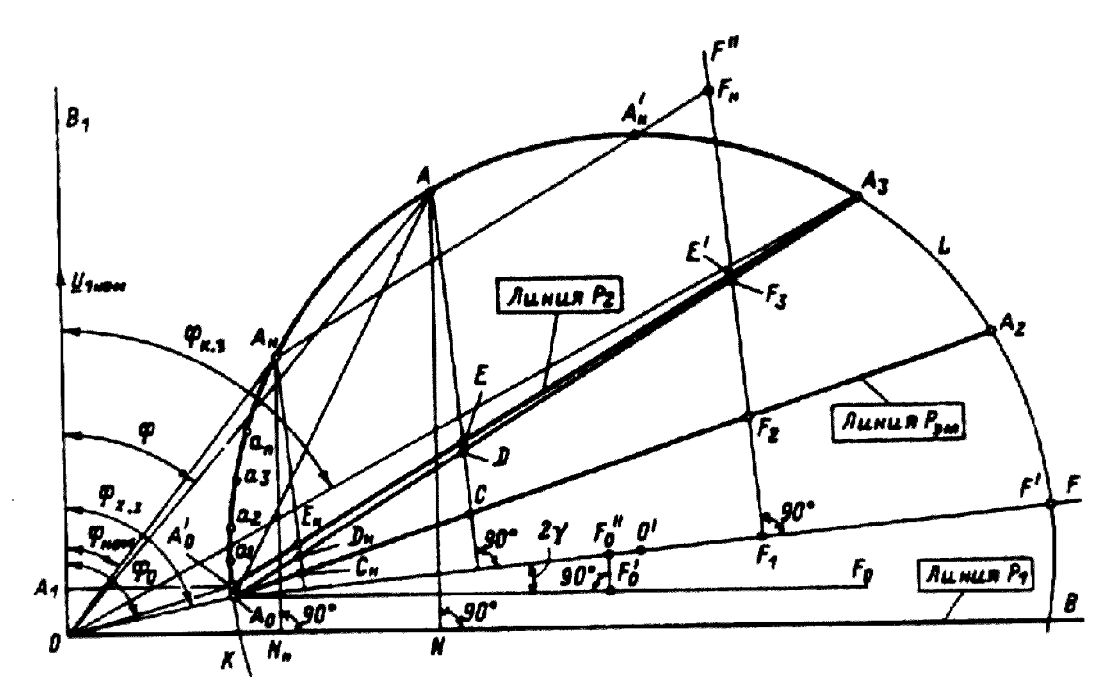


Рис. 9.56. Круговая диаграмма асинхронной машины

Чтобы размеры круговой диаграммы были удобны для работы, целесообразно вначале выбрать ее диаметр $D_К$ (в пределах 200. ..250 мм), после чего рассчитать масштабы: масштаб тока, А/мм: $m_I = \dfrac{U_{1НОМ}}{c_1 x_{К1} D_К}$; масштаб мощности, Вт/мм: m_P = 3 $U_{ном}$ m_I; масштаб момента, Нм/мм: $m_M = m_P / \Omega$, где $\Omega = \dfrac{2\pi f_1}{P}$.

При построении диаграммы вектор напряжения $\dot{U}_{1ном}$ направляют по оси ординат OB_1. Из начала координат строят вектор тока синхронного холостого хода $0A_0 \dfrac{1}{m_I} I_0$— под углом φ_0 к оси ординат φ_0 = arccos $\dfrac{I_{0a}}{I_0}$. Точку A_0, удобно найти, отложив по вертикальной и горизонтальной осям ее координаты, соответственно равные $I_{0а}$ и $I_{0р}$.

Через точку A_0 проводят линии $A_0F_0 \parallel OB$ и A_0F под углом 2γ к оси ординат. Из-за малости γ построение угла < F_0A_0F удобно выполнять следующим образом. В произвольной точке F_0 прямой A_0F_0 восстанавливают перпендикуляр к линии A_0F_0 и откладывают на нем отрезок

$$|F_0 F''_0| = |A_0 F_0| \operatorname{tg} 2\gamma \approx |A_0 F_0|\, 2 \operatorname{tg} \gamma;$$

$$tg\gamma = \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})}$$

Линия A_0F определяет положение диаметра круговой диаграммы. Отложив на ней отрезок $|A_0O'|$ = 0,5 $D_к$, проводят окружность с центром O' радиусом 0,5$D_к$.

Через произвольную точку F_1 диаметра A_0F проводят линию $(F' F_1) \perp (A_0F)$ и откладывают на ней отрезки $|F_1F_2| = |A_0F_1| \dfrac{r_1}{x_{K1}}$ и $|F_1F_3| = |A_0F_1| \dfrac{r_{K1}}{x_{K1}}$. Через точку A_0 и точки F_2 и F_3, проводят прямые до пересечения их с окружностью соответственно в точках A_2 и A_3. На оси ординат откладывают отрезок $|0A_1| = P_0/m_p$, где $P_0 = P_{ст} + 3\ I_0^2 r_1 + P_{мех}$, и через точку A_1 проводят $|A_1A'_0| \parallel B0$. Точку A'_0 соединяют с точками 0 и A_3. На этом построение круговой диаграммы заканчивается.

Окружность диаметром $D_к$ и с центром $0'$ является геометрическим местом концов векторов тока статора двигателя при различных скольжениях. Точка окружности A_0 определяет положение конца вектора тока I_0 при синхронном холостом ходе, а точка A'_0 — при реальном холостом ходе двигателя. Отрезок О A'_0 определяет ток $I_{х.х}$, а угол $< A'_0 0 B_1 - \cos\varphi_{к.з}$. Точка A_2 окружности определяет положение конца вектора тока при коротком замыкании ($s = 1$), отрезок $0A_3$ — ток $I_{к.з}$, а угол $< A_3 0 B_1 - \cos\varphi_{к.з}$. Точка A_2 определяет положение конца вектора тока при $s = \infty$.

Промежуточные точки на дуге окружности A_0A_3 определяют положение концов векторов тока I_1 при различных нагрузках в двигательном режиме ($0 < s \leq 1$). Ось абсцисс диаграммы ОВ является линией первичной мощности P_1. Линией электромагнитной мощности $P_{эм}$ или электромагнитных моментов $M_{эм}$ является линия A_0A_2. Линией полезной мощности на валу (вторичной мощности P_2) является линия A'_0A_3. По круговой диаграмме для тока статора, которому соответствует точка А на окружности, можно рассчитать необходимые для построения рабочих характеристик данные:

ток статора, А, $I_1 = m_I|0A|$;

ток ротора, А, $I'_2 = m_I|A_0A|$;

первичную мощность, Вт, $P_1 = m_p\,|AN|$, где $AN \perp 0B$;

электромагнитную мощность, Вт, $P_{эм} = m_p\,|AC|$, где $AC \perp A_0F$;

электромагнитный момент $M_{эм} = m_м\,|AC|$;

полезную мощность, Вт, $P_2 = m_p\,|AE|$;

КПД $|AE| / |AN|$;

коэффициент мощности $\cos\varphi = \cos < AOB_1$;

скольжение двигателя $|DC| / |AC|$.

Для построения рабочих характеристик вначале находят положение на окружности точки $A_н$, которая соответствует номинальному режиму работы. Для этого, исходя из заданной номинальной мощности $P_{2ном}$, рассчитывают длину отрезка $|E'F_н| = P_{2ном} / m_p$ и откладывают на линии $F_1F' \perp A_0F$ от точки ее пересечения E' с линией полезной мощности A'_0A_3. Через точку $F_н$ проводят $F_нA_н \parallel A'_0A_3$. Точки пересечения $F_НA_Н$ с окружностью $A_н$ и $A'_н$ определяют положение концов вектора тока I_1 при мощности $P_{2ном}$. Точка $A_н$, ближайшая к A'_0, соответствует номинальному режиму, точка $A'_н$ — режиму неустойчивой работы двигателя (при $s > s_{кр}$).

Наметив на дуге $A_0A_н$ несколько точек a_1, a_2, a_3, ..., определяют соответствующие каждой из них данные I_1, P_1, P_2, cosφ, η, M, s.

Из круговой диаграммы можно найти также приближенное значение кратности максимального момента M_{max}. Оно будет несколько занижено, так же как и в аналитическом расчете без учета изменения параметров от насыщения полями рассеяния и от действия эффекта вытеснения тока.

Расчет рабочих характеристик по круговой диаграмме связан с определенными погрешностями при выполнении графических работ. Некоторое уточнение может дать сочетание графического метода и элементов аналитического. Например, I_1, I_2 и cosφ определяют по круговой диаграмме, а суммы потерь, P_2, P_1, s и η – расчетным путем, используя данные круговой диаграммы. В этом случае можно также учесть дополнительные потери, которые при построении круговой диаграммы не принимают во внимание [6].

Такая методика расчета иногда применяется на практике. Однако все более широкое распространение ЭВМ делает аналитический метод расчета рабочих характеристик более предпочтительным.

9.13. РАСЧЕТ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Учет эффекта вытеснения тока. С увеличением частоты тока в стержнях обмотки короткозамкнутого ротора возникает эффект вытеснения тока, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней уменьшается, при этом активное сопротивление ротора увеличивается, а индуктивное уменьшается. Изменение сопротивлений ротора влияет на пусковые характеристики машины.

В большинстве случаев эффект вытеснения тока в обмотках короткозамкнутых роторов играет положительную роль, так как увеличивает начальные моменты двигателей. Это широко используют при проектировании асинхронных машин, выполняя роторы с глубокими прямоугольными или фигурными пазами или с двойной беличьей клеткой, в которых эффект вытеснения тока проявляется особенно сильно. Однако неравномерное распределение плотности тока по сечению стержня ротора может привести и к нежелательным последствиям. Например, при неудачно выбранных размерных соотношениях стержней чрезмерно возрастающая в пусковых режимах плотность тока в их верхних участках может вызвать неравномерное тепловое удлинение стержней и их изгиб. При этом стержни разрывают усики пазов и выгибаются в воздушный зазор, что неизбежно приводит к выходу двигателя из строя. В связи с этим правильный

учет влияния эффекта вытеснения тока является необходимым при проектировании асинхронных машин с короткозамкнутыми роторами.

В расчетах удобнее определять не непосредственно активное и индуктивное сопротивления стержней при неравномерной плотности тока, а их относительные изменения под действием эффекта вытеснения тока. Эти изменения оценивают коэффициентами $k_г$ и $k_д$. Коэффициент $k_г$ показывает, на сколько увеличилось активное сопротивление пазовой части стержня $r_{c\xi}$ при неравномерной плотности тока в нем по сравнению с его сопротивлением r_c при одинаковой плотности по всему сечению стержня:

$$k_r \quad r_{c\xi}/r_c. \tag{9.238}$$

Коэффициент демпфирования $k_д$ показывает, как уменьшилась магнитная проводимость $\lambda_{п\xi}$ участка паза, занятого проводником с током, при действии эффекта вытеснения тока по сравнению с проводимостью того же участка, но при равномерной плотности тока в стержне

$$k_д \quad \lambda'_{n\xi}/\lambda'_n \tag{9.239}$$

Аналитическими выражениями, определяющими $k_г$ и $k_д$, полученными для прямоугольных стержней при допущениях о постоянстве удельного сопротивления материала стержня по всей площади его поперечного сечения, бесконечности магнитной проницаемости стали магнитопровода и прямолинейности магнитных линий потока рассеяния в пазу, являются

$$\left.\begin{aligned} k_r &= \xi\frac{sh2\xi + \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi}; \\ k_Д &= \frac{3}{2\xi}\frac{sh2\xi - \sin 2\xi}{ch2\xi - \cos 2\xi} \end{aligned}\right\} \tag{9.240}$$

В этих выражениях ξ, так называемая «приведенная высота» стержня, — величина безразмерная, значение которой определяется по формуле

$$\xi \quad 2\pi h_c\sqrt{\frac{b_п}{b_п}\frac{f_2}{\rho_{c\vartheta}}}10^{7} \tag{9.241}$$

где h_c — высота стержня в пазу, м: $h_c = h_п - (h_ш + h'_ш)$; b_c и $b_п$ — ширина стержня и ширина паза, м. При расчете роторов со вставными стержнями принимают b_c = 0,96 $b_п$; в роторах с литой обмоткой — $b_c = b_п$; f_2 — частота тока в роторе в расчетном режиме, Гц; $\rho_{c\vartheta}$ — удельное сопротивление материала стержня при расчетной температуре, Ом-м.

Для двигателей общего назначения с медными вставными стержнями короткозамкнутого ротора при расчетной температуре 75° С ($\rho_{c75} = 10^{-6}/47$ Ом·м, см. табл. 5.1) из (9.241) имеем

$$\xi = 96{,}32\, h_c \sqrt{s}\sqrt{\frac{b_c}{b_n}} \qquad (9.242)$$

При расчетной температуре 115° С ($\rho_{c115} = 10^{-6}/41$ Ом·м)

$$\xi = 89{,}96\, h_c \sqrt{s}\sqrt{\frac{b_c}{b_n}} \qquad (9.243)$$

При литой алюминиевой обмотке ротора при расчетных температурах 75° С ($\rho_{c75} = 10^{-6}/21{,}5$ Ом·м) и 115° С ($\rho_{c115} = 10^{-6}/20{,}5$ Ом·м) соответственно имеем

$$\xi = 61{,}15\, h_c \sqrt{s} \qquad (9.244)$$

$$\xi = 63{,}61\, h_c \sqrt{s} \qquad (9.245)$$

Анализ зависимостей (9.240) показывает, что при $\xi \le 1$ эффект выяснения тока практически не влияет на сопротивления стержней. Это является критерием необходимости его учета при проектировании.

В расчетах условно принимают, что при действии эффекта вытеснения ток ротора распределен равномерно, но не по всему сечению стержня, а лишь по его верхней части, ограниченной высотой $h_г$, имеющей сечение $q_г$ и сопротивление $r_{c\xi} = r_с\ q_с\ /q_г$; $h_г$ называют глубиной проникновения тока в стержень. Для прямоугольных стержней $h_г = h_с/\ k_г$.

При определении $\lambda_{п\xi}$ аналогично принимают, что ток равномерно распределен по верхней части сечения стержня высотой $h_г$.

В практических расчетах для определения $k_г$, и $k_д$ пользуются не аналитическими зависимостями (9.240), а построенными на их основе кривыми $\varphi(\xi)$ и $\varphi'(\xi)$ (рис. 9.57 и 9.58). Принятые при выводе (9.240) допущения приводят к положению, что на глубину проникновения не влияют высота и конфигурация стержня. Это позволяет использовать (9.240) и кривые $\varphi(\xi)$ и $\varphi'(\xi)$ для определения $k_г$ и $k_д$ в стержнях различных конфигураций. Расчет проводят в следующей последовательности. По полной высоте стержня, частоте тока и удельному сопротивлению материала стержня из табл. 5.1 по (9.241) определяют функцию ξ, в соответствии с которой по кривым рис. 9.57 находят функцию φ, а по кривым рис. 9.58 — функцию φ'.

Далее определяют глубину проникновения тока

$$h_r = h_c/(1+\varphi) \qquad (9.246)$$

и коэффициент $k_д = \varphi'$.

Коэффициент $k_г$ определяют по отношению площадей всего сечения стержня и сечения, ограниченного высотой $h_г$, т. е.

$$k_r = q_c/q_r. \qquad (9.247)$$

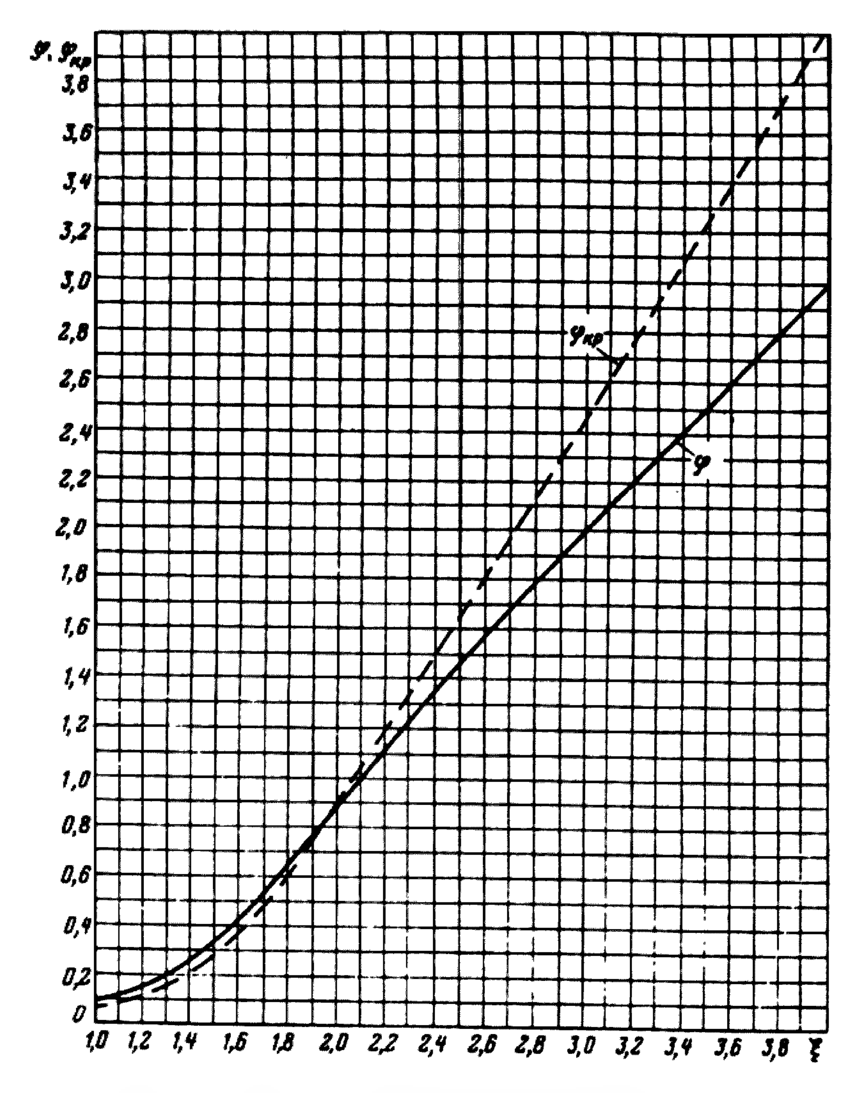


Рис. 9.57. Кривые φ и $φ_{кр}$ в функции "приведенной высоты" ξ (φ = ξ – 1 при ξ > 4 и φ = 0,89$ξ^4$ при ξ < 1)

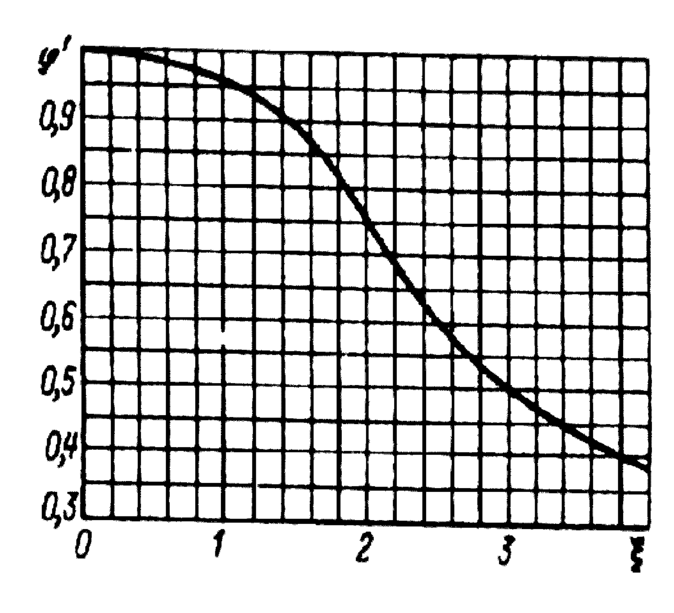


Рис. 9.58. Зависимость φ' от "приведенной высоты" ξ: при ξ > 4 φ = 3/2 ξ

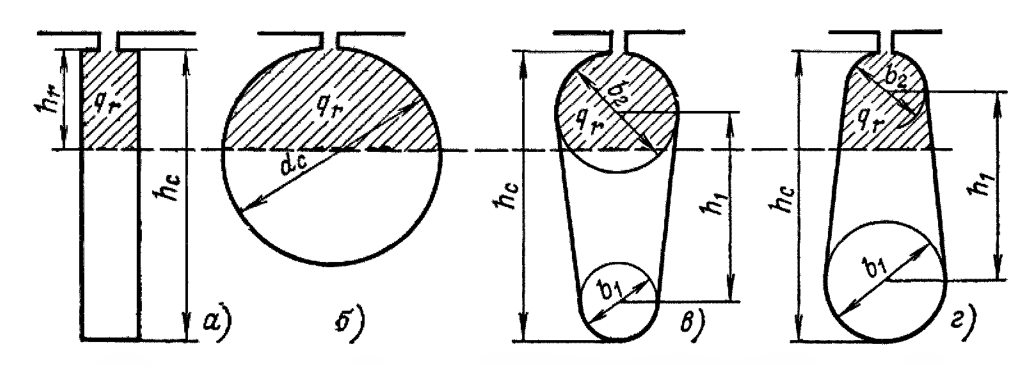


Рис. 9.59. К расчету Кг в стержнях различной конфигурации:
$h_г$ — расчетная глубина проникновения тока

По значениям $k_г$ и $k_д$ можно найти сопротивление пазовой части стержня обмотки ротора и коэффициент магнитной проводимости участка паза ротора, занятого стержнем с током:

$$r_{c\xi} = k_r r_c; \qquad (9.248)$$

$$\lambda'_{n\xi} = k_д \lambda'_n \qquad (9.249)$$

Для определения $k_г$ в стержнях некоторых наиболее распространенных конфигураций используют заранее полученные расчетные формулы.

Для прямоугольных стержней (рис. 9.59, а)

$$k_r = q_c / q_r = h_c / h_r \approx 1 + \varphi. \qquad (9.250)$$

Для круглых стержней (рис. 9.59, б)

$$k_r = q_c / q_r = 1 + \varphi. \qquad (9.251)$$

Функция $\varphi_{кр}$ для круглого стержня представлена на рис. 9.57.

Для грушевидных стержней (рис. 9.59, в)

$$\left.\begin{aligned} k_r &= q_c / q_r \\ q_c &= \frac{\pi(b_1^2 + b_2^2)}{8} + \frac{b_1 + b_2}{2} h \end{aligned}\right\} \qquad (9.252)$$

Площадь сечения $q_г$ при $\frac{b_1}{2} \le h_г \le h_1 + \frac{b_1}{2}$

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2}\left(h_r - \frac{b_1}{2}\right), \qquad (9.253)$$

где

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1}\left(h_r - \frac{b_1}{2}\right)$$

$$h_r = h_c / (1 + \varphi).$$

При $h_г \le b_1/2$ площадь

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{4(\varphi_{кр}+1)} \qquad (9.254)$$

При $h_г > h_1 + b_1/2$ принимают $q_г \approx q_с$ и $k_г = 1$. Для трапецеидальных стержней с узкой верхней частью (см. рис. 9.59, г)

$$k_r = q_c/q_r,$$

$q_с$ определяют по (9.252). Площадь $q_г$ при $h_г \le b_1/2$ определяют по (9.254) и при $h_г \ge b_1/2$ — по (9.253), причем

$$b_r = b_1 + \frac{b_2 - b_1}{h_1}\left(h_r - \frac{b_1}{2}\right) \qquad (9.255)$$

Для других конфигураций стержней $k_г$, может быть определен из общего выражения $k_г = q_с/q_г$ с учетом размерных соотношений стержня и глубины проникновения тока в стержень $h_г$.

Для расчета характеристик необходимо учитывать изменение сопротивления всей обмотки ротора r_2 поэтому удобно ввести коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = r_{2\xi}/r_2, \qquad (9.256)$$

где $r_{2\xi}$ — сопротивление фазы короткозамкнутого ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока.

Выражение (9.256) легко преобразовать в более удобный для расчета вид:

$$K_R = \frac{r_2 + r_c(k_r - 1)}{r_2} = 1 + \frac{r_c}{r_2}(k_r - 1) \qquad (9.257)$$

Для прямоугольных стержней это выражение приобретает вид

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2}\varphi. \qquad (9.258)$$

В (9.257) и (9.258) для роторов без радиальных вентиляционных каналов с литой обмоткой (с прилегающими замыкающими кольцами) $r'_с = r_с$.

Для роторов с радиальными вентиляционными каналами и роторов с отставленными замыкающими кольцами

$$r'_c = r_c\frac{l_c - n_k b_k}{l_2} \qquad (9.259)$$

где $l_с$ — полная длина стержня, равная расстоянию между замыкающими кольцами, м; $n_к$ и $b_к$ — число и ширина, м, радиальных вентиляционных каналов; l_2 — длина сердечника ротора, м.

Активное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом вытеснения тока будет равно:

$$r_{2\xi} = r_2 K_R. \qquad (9.260)$$

Обозначив коэффициентом K_x изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока, получим

$$x_{2\xi} = x_2 K_x, \qquad (9.261)$$

тогда

$$K_x = \frac{\lambda_{П2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{Д2}}{\lambda_{П2} + \lambda_{л2} + \lambda_{Д2}} \qquad (9.262)$$

где $\lambda_{п2\xi}$ — коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока:

$$\lambda_{п2\xi} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2\xi}$$

здесь

$$\Delta\lambda_{п2\xi} \quad \lambda'_{п2}(1 \quad k_Д);$$

$\lambda'_{п2}$ — коэффициент магнитной проводимости участка паза, занятого проводником с обмоткой (выражение для определения $\lambda'_{п2}$ в формулах табл. 9.27 является множителем перед коэффициентом $k_Д$).

Влияние насыщения на параметры. В предыдущих параграфах рассматривались методы расчета параметров при допущении отсутствия насыщения стали магнитопровода полями рассеяния, магнитная проницаемость которой принималась равной бесконечности. При расчетах параметров холостого хода и рабочих режимов это допущение вполне оправдано, так как токи в этих режимах относительно малы и потоки рассеяния не создают заметного падения магнитного напряжения в стали зубцов. При увеличении скольжения свыше критического и в пусковых режимах токи в обмотках возрастают и потоки рассеяния увеличиваются. Коронки зубцов статора и ротора в машинах средней и большой мощности в большинстве случаев оказываются сильно насыщенными.

Насыщение коронок зубцов (рис. 9.60) приводит к увеличению магнитного сопротивления для части потока рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через верхнюю часть паза. Поэтому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается. Несколько снижается также магнитная проводимость дифференциального рассеяния. На коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния насыщение стали потоками рассеяния влияния не оказывает.

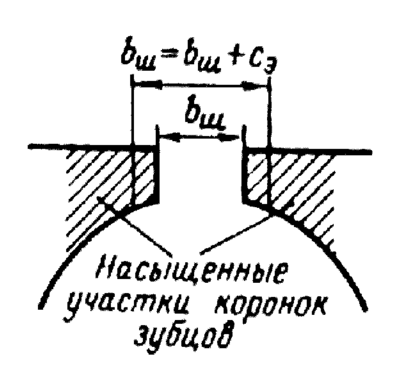


Рис. 9.60. Насыщение участков коронок зубцов потоком рассеяния

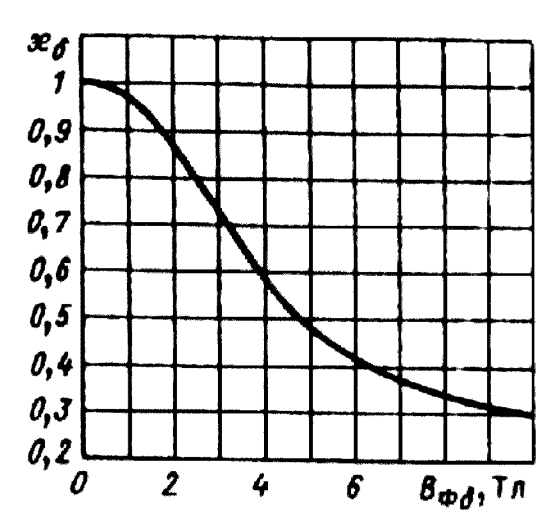


Рис. 9.61. Функция $K_δ$ в зависимости от фиктивной индукции $B_{δф}$

Уменьшение потока пазового рассеяния из-за насыщения приближенно учитывают введением дополнительного раскрытия паза, равного $c_э$. Дополнительное раскрытие $c_э$ принимается таким, чтобы его магнитное сопротивление потоку рассеяния было равно магнитному сопротивлению насыщенных участков зубцов. При этом условии можно использовать для расчета коэффициент магнитной проводимости паза с учетом насыщения обычные формулы, предполагая, что $\mu_{ст} = \infty$. Уменьшение $\lambda_п$ из-за насыщения участков зубцов ($\Delta\lambda_{п.нас}$) будет определяться $c_э$. Таким образом, $c_э$ зависит от уровня насыщения верхней части зубцов потоками рассеяния и, следовательно, от МДС паза, т. е. от тока в обмотке. Так как ток обмотки, в свою очередь, зависит от индуктивного сопротивления, определяемого магнитной проводимостью, то расчет приходится проводить методом последовательных приближений. Первоначально задаются предполагаемой кратностью увеличения тока, обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны:

$$k_{нас} = I_{нас}/I,$$

где I – ток, рассчитанный для данного режима без учета насыщения; $I_{нас}$ – ток в этом же режиме работы машины при насыщении участков зубцов полями рассеяния.

Ориентировочно для расчета пусковых режимов принимают $k_{нас}$ = 1,25...1,4; для режима максимального момента $k_{нас}$ = 1,1...1,2.

Для двигателей с открытыми пазами следует задаваться меньшими значениями $k_{нас}$, при полузакрытых пазах — большими.

Расчет проводят в следующей последовательности. Определяют среднюю МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора:

$$F_{П.СР} = 0{,}7\frac{k_{нас} I_1 u_{п1}}{a}\left(k_\beta + k_{y1} k_{об1}\frac{Z_1}{Z_2}\right) \qquad (9.263)$$

где I_1 — ток статора, соответствующий расчетному режиму, без учета насыщения; a — число параллельных ветвей обмотки статора; $u_{п1}$— число эффективных проводников в пазу статора; k_β — коэффициент, учитывающий уменьшение МДС паза, вызванное укорочением шага обмотки, рассчитывается по (9.156) или по (9.157); $k_{у1}$ — коэффициент укорочения шага обмотки.

По средней МДС $F_{п.ср}$ рассчитывают фиктивную индукцию потока рассеяния в воздушном зазоре, Тл:

$$B_{ф\delta} = \frac{F_{п.ср}}{1{,}6\delta\, C_N} 10^{\ 6} \tag{9.264}$$

где коэффициент

$$C_N = 0{,}64 + 2{,}5\sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} \tag{9.265}$$

(t_{Z1} и t_{Z2} — зубцовые деления статора и ротора).

По полученному значению $B_{\delta ф}$ определяют отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины, характеризуемое коэффициентом k_δ, значение которого находят по кривой рис. 9.61.

Далее рассчитывают значения дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора и ротора ($c_{э1}$ и $c_{э2}$), магнитные напряжения которых будут эквивалентны МДС насыщенных участков усиков зубцов. Для пазов статора его принимают равным:

$$c_{Э1} \quad (t_{z1} - b_{ш1})(1 - k_\delta). \tag{9.266}$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния открытого паза (рис. 9.62, а)

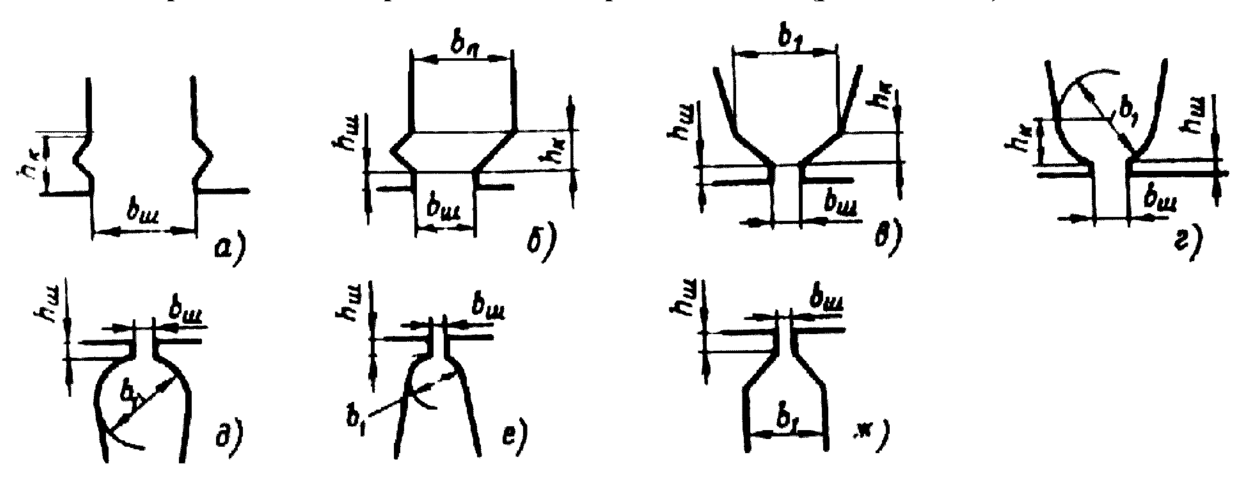


Рис. 9.62. К расчету влияния насыщения потоком рассеяния на коэффициент магнитной проводимости паза:
а—ж — различные конфигурации верхней части пазов

$$\Delta\lambda_{П1НАС} = \frac{h_к}{b_ш}\frac{c_{Э1}}{b_ш + c_{Э1}} \tag{9.267}$$

Для полуоткрытых и полузакрытых пазов расчетная формула несколько усложняется из-за более сложной конфигурации их верхних клиновых частей. Для полуоткрытого паза (рис. 9.62, б)

$$\Delta\lambda_{П1НАС} = \frac{h_к}{b_Ш}\frac{c_{Э1}}{b_Ш + c_{Э1}} + \frac{h_k}{b_Ш + b_П}\frac{C_{Э1}}{b_Ш + b_П + c_{Э1}} \tag{9.268}$$

Для полузакрытого паза (рис. 9.62, в, г)

$$\Delta\lambda_{П1НАС} = \frac{h_Ш + 0{,}58\,h_к}{b_Ш}\frac{c_{Э1}}{c_{Э1} + 1{,}5\,b_Ш} \tag{9.269}$$

Для фазных и короткозамкнутых роторов дополнительное раскрытие рассчитывают по формуле

$$c_{Э2} = (t_2 - b_ш)(1 - k_\delta). \tag{9.270}$$

Уменьшение коэффициента проводимости для открытых и полузакрытых пазов ротора (рис. 9.62, д—ж)

$$\Delta\lambda_{П2НАС} = \frac{h_Ш}{b_Ш}\frac{c_{Э2}}{b_Ш + c_{Э2}} \tag{9.271}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении $\lambda_{п1нас}$ определяют для статора по выражению

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_п - \Delta\lambda_{п1нас}, \tag{9.272}$$

где $\lambda_{п1}$ — проводимость, рассчитанная без учета насыщения.

Для ротора

$$\lambda_{п2нас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас}, \tag{9.273}$$

где $\lambda_{п2\xi}$ — проводимость пазового рассеяния ротора для ненасыщенной зубцовой зоны с учетом влияния вытеснения тока.

Коэффициенты проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов статора $\lambda_{д1нас}$ и ротора $\lambda_{Д2нас}$

$$\left.\begin{aligned} \lambda_{Д1НАС} &= \lambda_{Д1} k_\delta \\ \lambda_{Д2НАС} &= \lambda_{Д2} k_\delta \end{aligned}\right\} \tag{9.274}$$

Значения $к_\delta$ принимают по кривым, представленным на рис. 9.61.

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения от полей рассеяния определяют по отношению сумм коэффициентов проводимости, рассчитанных без учета и с учетом насыщения от полей рассеяния:

$$x_{1НАС} = x_1 \frac{\sum\lambda_{1НАС}}{\sum\lambda_1} = x_1 \frac{\lambda_{П1НАС} + \lambda_{Д1НАС} + \lambda_{л1}}{\lambda_{П1} + \lambda_{Д1} + \lambda_{л1}} \tag{9.275}$$

Для ротора принимают отношения сумм проводимостей, рассчитанных без учета влияния насыщения и действия эффекта вытеснения тока (для номинального режима) и с учетом этих факторов:

$$x_{2\xi НАС} = x_2 \frac{\sum \lambda_{2\xi НАС}}{\sum \lambda_2} = x \frac{\lambda_{П2\xi НАС} + \lambda_{Д2\,НАС} + \lambda_{Л2}}{\lambda_{П2} + \lambda_{Д2} + \lambda_{л2}} \qquad (9.276)$$

Значения параметров $x_{1нас}$ и $x_{2нас}$ используют при расчете точек характеристик при скольжениях $s \geq s_{кр}$. Полученные для каждой из точек характеристики отношения токов, рассчитанных с учетом и без учета насыщения, сравнивают с принятыми коэффициентами $k_{нас}$. Если расхождение превышает 10...15 %, то расчет для этого значения s повторяют, внося соответствующую корректировку в первоначально принимаемый коэффициент $k_{нас}$.

Расчет пусковых характеристик. Пусковые свойства асинхронных двигателей характеризуются начальным пусковым и максимальным моментами и начальным пусковым током. В двигателях с фазными роторами начальный момент и пусковой ток определяются сопротивлением пускового реостата. В двигателях с короткозамкнутыми роторами значения моментов и начального тока зависят от соотношений параметров. Кроме того, важным показателем пусковых свойств короткозамкнутого двигателя является значение минимального момента. Уменьшение момента в процессе разгона двигателя может произойти в связи с изменением соотношения параметров при уменьшении скольжения.

Стандарты на асинхронные двигатели устанавливают наименьшие допустимые относительные значения моментов и наибольшие относительные значения начальных пусковых токов для выпускаемых асинхронных машин в зависимости от их мощности, исполнения и числа пар полюсов. Для короткозамкнутых двигателей регламентируются значения всех перечисленных выше моментов и тока, а для двигателей с фазными роторами — только значения максимальных моментов, т. е. перегрузочная способность двигателей.

В табл. 9.31 приведены допустимые относительные значения моментов и начального пускового тока двигателей с короткозамкнутыми роторами серии 4А. Спроектированная заново асинхронная машина на базе серии 4А должна иметь пусковые характеристики, удовлетворяющие этим требованиям. В технических условиях или в заданиях на проектирование специальных асинхронных двигателей могут быть поставлены более жесткие требования к этим величинам.

В практике расчетов часто ограничиваются определением только двух точек характеристик: начального пускового и максимального моментов и начального пускового тока. Такой расчет дает лишь приближенные сведения о пусковых

Таблица 9.31. Кратность начальных пусковых моментов $M^*_п$ токов $I^*_п$ асинхронных двигателей

Исполнение	2р	Высота оси вращения, мм					
		≤ 132		160-250		≥ 280	
		$M^*_п$	$I^*_п$	$M^*_п$	$I^*_п$	$M^*_п$	$I^*_п$
IP44	2	1,7-2	6,5-7,5	1,2-1,4	7-7,5	1-1,2	6,5-7
	4	2-2,2	5-7,5	1,2-1,4	6,5-7,5	1,2-1,3	5,5-7
	6	2-2,2	4-6,5	1,2-1,3	5-6,5	1,4	5,5-6,5
	8	1,6-1,9	4-5,5	1,2-1,4	5,5-6	1,2	5,5-6,5
	10	-	-	1,2	6	1	6
	12	-	-	-	-	1	6
IP23	2	-	-	1,2-1,3	7,0	1,2	6,5-7
	4	-	-	1,2-1,3	6,5	1,2	6,0-7
	6	-	-	1,2	6-7	1,2	6
	8	-	-	1,2-1,3	5,5-6,0	1,2	5,0-5,5
	10	-	-	-	-	1	5,5
	12	-	-	-	-	1	5,5

Примечание. Некоторые двигатели малой мощности с высотой оси вращения h ≤ 80 мм выполняются с уменьшенной кратностью начального пускового тока.

свойствах двигателя и может привести к погрешности при определении перегрузочной способности из-за неточности определения критического скольжения. Поэтому при проектировании целесообразно рассчитывать полные пусковые характеристики, т. е. зависимости $M^* = f(s)$ и $I^* = f(s)$ для всего диапазона изменения скольжении от $s = 1$ до значения, соответствующего режиму, близкому к номинальному.

Расчет пусковых характеристик затруднен необходимостью учета изменений параметров, вызванных эффектом вытеснения тока и насыщением от полей рассеяния, так как при больших скольжениях токи в обмотках статора и ротора короткозамкнутых двигателей могут превышать свое минимальное значение в 7-7,5 раза (см. табл. 9.31).

В то же время при больших токах увеличивается падение напряжения на сопротивлении обмотки статора, что вызывает уменьшение ЭДС и снижение основного потока. Для учета этих факторов необходимо применение ЭВМ [6]. При ручном счете используют следующий упрощенный метод.

Учитывая, что индуктивное сопротивление взаимной индукции x_{12} с уменьшением насыщения магнитопровода увеличивается, в расчете пусковых характеристик для скольжений $s \geq 0{,}1...0{,}15$ оно может быть принято равным:

$$x_{12П} \approx x_{12}\frac{F_Ц}{F_\delta} = k_\mu x_{12} \qquad (9.277)$$

Не внося большой погрешности, в расчетных формулах пусковых режимов пренебрегают сопротивлением r_{12}. Это оправдано при токах, заметно превышающих номинальный, так как электрические потери в обмотках, возрастающие пропорционально квадрату тока, многократно превышают потери в стали, для учета которых в схему смещения введен параметр r_{12}.

При этих допущениях коэффициент

$$c_{1П} \quad 1 + x_1/x_{12П} \tag{9.278}$$

и сопротивление правой ветви Г-образной схемы замещения (см. рис. 9.55)

$$Z_{ВЕТВИ} \quad c_{1П}(Rn + jX_П), \tag{9.279}$$

где для упрощения расчетных формул в отличие от обозначений в расчете рабочих характеристик принято

$$\left.\begin{aligned} R_П &= r_1 + c_{1П} r_{2\xi}/s \\ X_П &= x_1 + c_{1П} x_{2\xi} \end{aligned}\right\} \tag{9.280}$$

Ток в обмотке ротора

$$I_2 = c_{1П} I_2 = \frac{U_{1ном} c_{1П}}{|Z_{ВЕТВИ}|} = \frac{U_{1НОМ}}{\sqrt{R_П^2 + X_П^2}} \tag{9.281}$$

Сопротивление всей схемы замещения для пусковых режимов

$$Z_{СХ} = \frac{c_{1П}(R_П + jX_П) j x_{12П} c_{1П}}{R_П + j(X_П + x_{12П})} \tag{9.282}$$

Из (9.279)— (9.282)

$$I_{1П} = \frac{U_{1НОМ}}{|Z_{СХ}|} = I_{2П} \frac{\sqrt{R_П^2 + (X_П + x_{12П})^2}}{c_{1П} x_{12П}} \tag{9.283}$$

Характеризующие пусковые данные машины кратность тока и момента при заданном s

$$\left.\begin{aligned} I_{1*} &= I_{1П}/I_{1НОМ} \\ M_* &= \left(\frac{I_{2r}}{I_{2НОМ}}\right)^2 K_R \frac{s_{НОМ}}{s} \end{aligned}\right\} \tag{9.284}$$

Полученные выражения (9.281) — (9.284) дают возможность рассчитать токи и моменты во всем диапазоне изменения скольжения от $s = 1$ до $s = 0{,}1$.

Расчет рекомендуется проводить в последовательности, определенной в формуляре (табл. 9.32) для пяти-шести точек характеристик в указанном диапазоне изменения скольжения.

Таблица 9.32. Формуляр расчета пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока

$P_{2ном}$ = ... кВт; $U_{1ном}$ = ... В; 2р = ...; $I_{1ном}$ = ... А;
$I'_{2ном}$ =… А; x_1 = ... Ом; x'_2 = ... Ом; $x_{12п}$ = ... Ом;
$c_{1п}$ = ...; r_1 = ... Ом; r'_2 = ... Ом; $s_{ном}$ =...

№ п/п	Расчетная формула	Единица величины	Скольжение s
			1 0,8……. $s = s_{кр}$
1	$\xi = 2\pi h_C \sqrt{\frac{b_C}{b_П} \frac{f_2}{p_{CV}} 10^{7}}$	—	
2	$\varphi = \varphi(\xi)$	—	
3	$h_r = h_c/(1+\varphi)$	мм	
4	$k_r = q_C / q_r$	—	
5	$K_R = 1 + \frac{r_C}{r_2}(k_r - 1)$	—	
6	$r_{2\xi} = K_R r_2$	Ом	
7	$k_д = \varphi\,(\xi)$	—	
8	$\lambda_{П2\xi} = \lambda_{П2} - \Delta\lambda_{П2\xi}$	—	
9	$K_X = \sum\lambda_{2\xi} / \sum\lambda_2$	—	
10	$x_{2\xi} = K_X x_2$	Ом	
11	$R_П = r_1 + c_{1П}\frac{r_{2\xi}}{s}$	Ом	
12	$X_П = x_1 + c_{1П} x_{2\xi}$	—	
13	$I_2 = U_{НОМ} / \sqrt{R_П^2 + X_П^2}$	—	
14	$I_{1П} = I_2 \sqrt{R_П^2 + (X_П + x_{12П})^2} / (c_{1П} x_{12П})$	А	
15	$I^* = I_1 / I_{1НОМ}$		
16	$M^* = \left(\frac{I_2}{I_{2НОМ}}\right) K_R \frac{s_{НОМ}}{s}$	—	

Для двигателей, полный ток паза которых $I_{1паза} = I_1 u_П / a$ в пусковых режимах превышает 400 А, необходимо учесть влияние насыщения от полей рассеяния на пусковые характеристики. Для этого в расчетах используют уменьшенные в

результате насыщения значения сопротивлений обмоток $x_{1нас}$ и $x'_{2\xi нас}$ а также коэффициента

$$c_{1п.нас} \quad 1 + X_{1нас}/x_{12п}. \qquad (9.285)$$

Степень влияния поля рассеяния на x_1 и $x'_{2\xi}$ зависит от токов в обмотках, но, в свою очередь, от этих сопротивлений существенно зависят токи статора и ротора. Поэтому прямой расчет $x_{1нас}$ и $x'_{2\xi нас}$ до получений пусковых характеристик невозможен. Значения $x_{1нас}$ и $x'_{2\xi нас}$ находят для каждого из назначенных скольжений методом последовательных приближений. Как известно, объем расчета этим методом зависит от правильного первоначального задания искомой величины. Для данного расчета хорошие результаты дает следующий практический метод задания токов.

Первоначально рассчитывают пусковые токи при $s = 1$ для значений x_1, $x'_{2\xi}$ и $c_{1П}$, полученных без учета насыщения (см. табл. 9.32). Далее задаются коэффициентом увеличения тока от насыщения зубцовой зоны полями рассеяния $k_{нас}$. Ориентировочно для двигателей, полный ток паза которых в пусковом режиме превышает 2000...2500 А, можно принять $k_{нас} = 1{,}4...1{,}5$; при полном токе паза, близком к 1000 А, $k_{нас} = 1{,}15... 1{,}2$. Напомним, что полный ток паза $I_{1паза} = I_1 u_П / a$ рассчитывается в данном случае по току статора, полученному в расчете без учета влияния насыщения для скольжения $s = 1$ (табл. 9.32).

Далее по (9.275), (9.276) и (9.285) рассчитывают $x_{1нас}$, $x'_{2\xi нас}$ и $c_{1п\,нас}$ и повторяют расчет токов, вводя полученные значения в расчетные формулы. Если расхождение полученного $k'_{нас}$ и принятого первоначально $k_{нас}$ не превышает 10...15 %, то расчет для $s = 1$ считают законченным. При больших расхождениях корректируют первоначальное задание $k_{нас}$ и повторяют расчет.

Для уменьшения объема расчета других точек характеристик поступают следующим образом.

Учитывая, что обычно насыщение зубцов полями рассеяния не сказывается на параметрах при токах $I_1 < (1{,}5...2)/I_{ном}$, принимают, что при скольжениях, близких к $s = 0{,}1...0{,}15$, изменение x_1 и $x'_{2\xi}$ не происходит и $k_{нас} = 1$. Далее, для каждого из назначенных больших скольжений задаются первоначальными значениями $k_{нас}$, исходя приближенно из линейного его изменения от $k_{нас} = 1$ при $s = 0{,}1...0{,}15$ до $k_{нас}$ при $s = 1$.

Такой метод задания первоначальных значений $k_{нас}$ позволяет правильно учесть влияние насыщения уже после первой или второй итерации.

Расчетные формулы для определения пусковых характеристик с учетом влияния насыщения полями рассеяния сведены в формуляр (табл. 9.33).

Расчет величины C_N по (9.265) предлагается выполнить до начала расчета характеристик, так как она остается постоянной при изменении скольжения.

Максимальный момент двигателя вначале определяют по приближенному значению критического скольжения:

$$S_{КР} \approx \frac{r_2}{x_1 / c_{1П} + x_2} \qquad (9.286)$$

После расчета всей пусковой характеристики значения $s_{кр}$ и M_{max}* уточняют.

Таблица 9.33. Формуляр расчета пусковых характеристик асинхронного двигатели с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

P_2 = ... кВт; U_1 = ... В; 2р = ...; $I_{1ном}$ = ... А; $I'_{2ном}$ = ... А;
x_1 = ... Ом; x'_2 = ... Ом; r_1 = ... Ом; r'_2 = ... Ом;
$x_{12П}$ = ... Ом; $s_{ном}$ = ...; C_N = ...

№ п/п	Расчетная формула	Единицы величины	Скольжение s			
			1	0,8	...	$s = s_{кр}$
1	$k_{НАС}$	—				
2	$F_{П.СР} = 0{,}7\dfrac{I_{1П} k_{НАС} u_П}{a}(k_\beta + k_{y1} k_{об1}\dfrac{Z_1}{Z_2})$	А				
3	$B_{\phi\delta} = F_{П.СР} 10^{6}/(1{,}6\delta C_N)$	Тл				
4	$k_\delta = f(B_{\phi\delta})$	—				
5	$c_{Э1} = (t_{Z1} - b_{Ш1})(1 - k_\delta)$	мм				
6	$\lambda_{П1НАС} = \lambda_{П1} - \Delta\lambda_{П1НАС}$	—				
7	$\lambda_{Д1НАС} = k_\delta \lambda_{Д1}$	—				
8	$X_{1НАС} = x_1 \sum\lambda_{1НАС} / \sum\lambda_1$	Ом				
9	$c_{1П} = 1 + x_{1НАС} / x_{12П}$	—				
10	$c_{Э2} = (t_{Z2} - b_{Ш2})(1 - k_\delta)$	мм				
11	$\lambda_{П2\xi НАС} = \lambda_{П2\xi} - \Delta\lambda_{П2НАС}$	—				
12	$\lambda_{Д2НАС} = k_\delta \lambda_{Д2}$	—				
13	$X_{2\xi НАС} = x_2 \sum\lambda_{2\xi НАС} / \sum\lambda_2$	Ом				
14	$R_{П.НАС} = r_1 + c_{1П.НАС} x_{2\xi НАС}$	Ом				
15	$X_{П.НАС} = x_{1НАС} + c_{1П.НАС} x_{2\xi НАС}$	Ом				
16	$I_{2НАС} = U_{1НОМ} / \sqrt{R^2_{П.НАС} + X^2_{П.НАС}}$	А				
17	$I_{1НАС} = I_{2НАС}\dfrac{\sqrt{R^2_{П.НАС} + (X_{П.НАС} + X_{12П})^2}}{c_{1П.НАС} x_{12П}}$	А				
18	$k_{НАС} = I_{1НАС} / I_{1П}$	—				
19	$I_{1*} = I_{1НАС} / I_{1НОМ}$	—				
20	$M_* = (\dfrac{I_{2НАС}}{I_{2НОМ}})^2 K_R \dfrac{s_{НОМ}}{s}$	—				

Примечания: 1. Полученное в п. 18 значение $k_{НАС}$ сравнить с принятым $k_{нас}$ (п. 1); при расхождении более 10—15% скорректировать значение $k_{нас}$ и повторить расчет для данного скольжения.
2. Ток I_1 (п. 2 и 18) принимается из данных расчета табл. 9.32 (п. 14) для соответствующего скольжения: $s = 1 \div s_{кр}$.
3. Ток $I'_{2ном}$ (п. 20) берется из данных расчета рабочих характеристик двигателя (см. табл. 9.30) для $s = s_{ном}$.

9.14. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С РОТОРАМИ, ИМЕЮЩИМИ ДВОЙНУЮ БЕЛИЧЬЮ КЛЕТКУ ИЛИ ФИГУРНЫЕ ПАЗЫ

Необходимость обеспечения высоких пусковых моментов для нормальной работы ряда приводов привела к довольно широкому распространению асинхронных двигателей с роторами, имеющими двойную беличью клетку со вставными стержнями или фигурными пазами, залитыми алюминием. В последние годы получили распространение также двухклеточные роторы с литыми обмотками. Конфигурация и размеры пазов с литыми обмотками не связаны какими-либо ограничениями, налагаемыми сортаментами профильной меди или латуни, поэтому они могут быть выполнены более рационально с точки зрения использования зубцовой зоны ротора и обеспечения высоких пусковых характеристик по сравнению со сварными клетками.

Расчет магнитной цепи двигателей с фигурными стержнями или двойной клеткой на роторе не отличается от расчета обычных асинхронных машин. Некоторая особенность расчета магнитного напряжения зубцовой зоны ротора учтена в расчетных формулах, приведенных в § 9.9.

Здесь и далее фигурный стержень литой обмотки ротора будем рассматривать как двойную клетку ротора, причем к пусковой клетке отнесем верхнюю (прямоугольную или полуовальную — в зависимости от формы фигурного паза) часть стержня, а к рабочей клетке — его нижнюю часть.

Расчет параметров двухклеточного ротора встречает существенные затруднения, так как распределение токов между стержнями верхней и нижней клеток определяется как соотношением их активных сопротивлений, так и частотой тока в роторе. В то же время при больших скольжениях распределение плотности токов в пределах сечений каждого из стержней также неравномерно из-за действия эффекта вытеснения тока.

При расчете параметров двухклеточных роторов применяют приближенные методы, позволяющие получить общее выражение для активного и индуктивного сопротивлений обеих обмоток ротора r_2 и x_2 с учетом распределения токов между стержнями верхней и нижней клеток в зависимости от скольжения ротора. Это дает возможность проводить расчет рабочих и пусковых характеристик двигателей по формулам, применяемым для расчета характеристик машин с одноклеточными роторами.

Рассмотрим один из таких приближенных практических методов расчета параметров двухклеточного ротора.

Схема замещения фазы двухклеточного ротора представлена на рис. 9.63. Как видно, сопротивления рабочей и пусковой клеток включены параллельно. Ветвь а–б–в

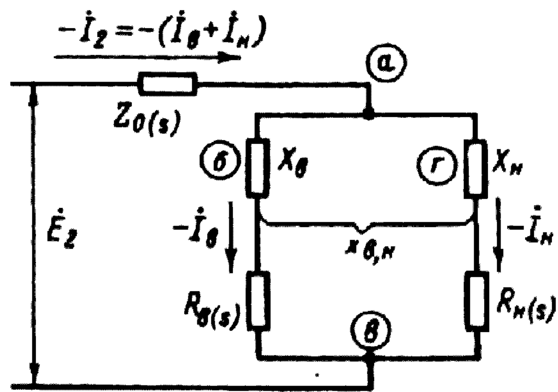


Рис. 9.63. Схема замещения фазы короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой

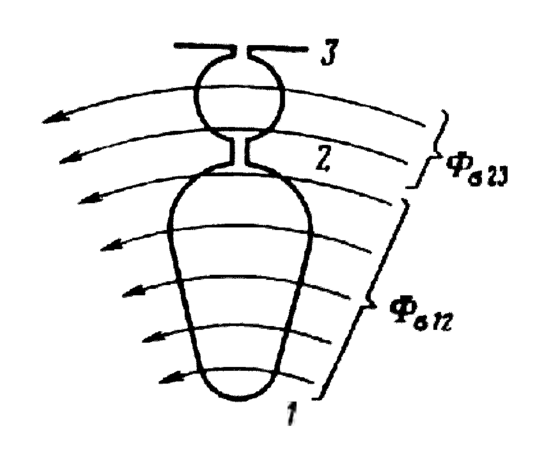


Рис. 9.64. Поток рассеяния в пазу двухклеточного ротора

содержит сопротивление верхней (пусковой) клетки, ветвь а—г—в сопротивления нижней (рабочей) клетки [6].

Схеме замещения соответствует система уравнений

$$\dot{I}_B(R_{B(S)}+jX_B)+\dot{I}_H jx_{в.н}+(\dot{I}_в+\dot{I}_н)Z_{0(S)}=\dot{E}_2; \qquad (9.287)$$

$$\dot{I}_B(R_{B(S)}+jX_B)+\dot{I}_H jx_{в.н}+(\dot{I}_в+\dot{I}_н)Z_{0(S)}=\dot{E}_2;$$

В этих уравнениях и на схеме замещения $\dot{I}_н$, $\dot{I}_в$ — токи в стержнях верхней и нижней клеток; $R_{в(s)}$ и $R_{н(s)}$ — активные, а $X_в$ и $X_н$ - индуктивные сопротивления соответственно верхней и нижней клеток; $x_{н.в}=x_{в.н}$ — сопротивление взаимной индукции между стержнями верхней и нижней клеток; $Z_{0(S)}$ — общее для обеих параллельных ветвей сопротивление.

Анализируя картину поля потока рассеяния в пазу двухклеточного ротора (рис. 9.64), видим, что часть потока пазового рассеяния $Ф_{σ12}$ сцеплена только со стержнем нижней клетки (участок паза 1-2), Оставшаяся часть потока $Ф_{σ23}$, магнитные линии которого проходят через паз выше нижнего стержня (участок паза 2-3), сцеплена со стержнями и верхней, и нижней клеток. Поэтому индуктивное сопротивление стержня нижней клетки определяется проводимостью всего потока рассеяния паза, а сопротивление индуктивности верхнего стержня и взаимная индуктивность верхнего и нижнего стержней определяются проводимостью потока $Ф_{σ23}$, так как только эта часть потока сцеплена одновременно и с верхним, и с нижним стержнями.

Исходя из этого, примем следующие обозначения: $x_{п.в}$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня верхней клетки, определяемое проводимостью верхней части паза $λ_{п.в}$ с учетом потокосцепления с верхним стержнем (поток $Ф_{σ23}$ создается МДС и верхнего, и нижнего стержней); $(x_н + x_в)$

— индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня нижней клетки, причем $x_н$ определяется проводимостью потоку рассеяния $Ф_{σ12}$ нижней части паза с учетом изменяющегося по высоте паза потокосцепления с нижним стержнем, а $x_в$ — проводимостью потоку рассеяния $Ф_{σ23}$ верхней части паза. Потокосцепление потока $Ф_{σ23}$ с нижним стержнем постоянно.

Кроме того, учтем, что сопротивление взаимной индукции $x_{в.н} = x_{н.в}$ определяется также проводимостью верхней части паза потоку $Ф_{σ23}$..

Детальный анализ потоков рассеяния и математическое выражение коэффициентов магнитной проводимости, определяющих указанные выше сопротивления, показывают, что для принятых в электромашиностроении конфигураций и размерных соотношений пазов верхней и нижней клеток без большой погрешности в уравнениях (9.287) можно принять $X_в \approx x_{н.в} \approx x_{в.н}$, так как эти сопротивления обусловлены проводимостью верхней части паза и

$$X_н \quad x_в + x_н.$$

При принятом допущении система уравнений (9.287) может быть записана следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} (I_A + I_I) Z_{0(s)} + (I_A + I_I) j x_A + I_A R_{B(s)} &= E_2 \\ (I_A + I_I) Z_{0(s)} + (I_A + I_I) j x_A + I_I (R_{I(s)} + j x_I) &= E_2 \end{aligned}\right\} \quad (9.288)$$

Системе уравнений (9.288) соответствует схема замещения, приведенная на рис. (9.288), которая может служить исходной для определения параметров двухклеточного ротора. Практические формулы дня расчета r_2 и x_2 роторов с общими и раздельными замыкающими кольцами несколько различаются.

Рассмотрим вначале метод расчета r_2 и x_2 роторов с общими замыкающими кольцами. Для таких роторов коэффициенты при неизвестных токах в уравнениях (9.288) обозначают следующие сопротивления: $R_В(s) + r_В / s$ — активное сопротивление стержня верхней клетки; $R_Н(s) = r_Н / s$ — активное сопротивление стержня нижней клетки; $x_в = x_{п.в}$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня верхней клетки; $x_н = x_{п.н}$ — индуктивное сопротивление пазового рассеяния стержня нижней клетки;

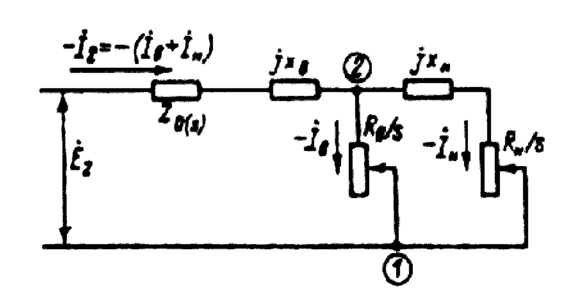


Рис. 9.65. Преобразованная схема замещения фазы короткозамкнутого ротора с двойной беличьей клеткой

$$Z_{0(S)} \quad Z_{кл(s)} + j x_д$$

где $Z_{кл(S)}$ — сопротивление участков замыкающих колец между двумя соседними пазами, приведенное к току ротора (см. § 9.10); $x_д$ — индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния обмотки ротора.

Эквивалентное сопротивление разветвленной цепи этой схемы между токами 1–2

$$Z_{э(s)} = \frac{r_{Á}/s(r_{Í}/s + j x_{Ï.Í})}{r_{Á}/s + r_{Í}/s + j x_{Ï.Í}} = \frac{1}{s}\frac{\alpha r_{Í} + j r_{Á}\beta S}{1 + j\beta S} \tag{9.289}$$

где

$$\left.\begin{aligned} \alpha &= \frac{r_{Á}/s}{r_{Á}/s + r_{Í}/s} = \frac{r_{Á}}{r_{Á} + r_{Í}} \\ \beta &= \frac{x_{Ï.Í}}{r_{Á} + r_{Í}} \end{aligned}\right\} \tag{9.290}$$

Представим $Z_{э(s)}$ в виде суммы активного $r_э$ и индуктивного $x_э$ сопротивлений:

$$Z_{э(s)} = r_{Ý}\frac{1}{s} + j x_{Ý} = \frac{1}{s}\frac{\alpha r_{Í} + r_{Á}\beta^2 s^2}{1 + \beta^2 s^2} + j\beta\frac{r_{Á} - \alpha r_{Í}}{1 + \beta^2 s^2}$$

и упростим выражение для $r_э$ и $x_э$

$$\left.\begin{aligned} r_{Ý} &= r_{Á}\left(1 - \frac{\alpha}{1 + \beta^2 s^2}\right) \\ \tilde{o}_{Ý} &= \tilde{o}_{Ï.Í}\frac{\alpha^2}{1 + \beta^2 s^2} \end{aligned}\right\} \tag{9.291}$$

Сопротивления $r_э$ и $x_э$ зависят от скольжения, так как изменение соотношения активных и индуктивных сопротивлений стержней, вызванное изменением частоты тока в роторе, изменяет соотношение токов в стержнях рабочей и пусковой клеток.

При скольжениях $s << 1$, соответствующих холостому ходу и номинальному режиму двигателей, из (9.291) получим

$$\left.\begin{aligned} r_{Э.XX} &= r_B(1 - \alpha) \\ x_{Э,XX} &= x_{П.Н}\alpha^2 \end{aligned}\right\} \tag{9.292}$$

Коэффициенты изменения эквивалентных сопротивлений $r_э$ и $x_э$ в зависимости от скольжения

$$k'_X = \frac{x_Э}{x_{Э.XX}} = \frac{1}{1 + \beta^2 s^2}; \tag{9.293}$$

$$k'_r = \frac{r_Э}{r_{Э.XX}} = \frac{1}{1 - \alpha}\left(1 - \frac{\alpha}{1 + \beta^2 s^2}\right) = \frac{1}{1 - \alpha}(1 - \alpha k'_X) \tag{9.294}$$

На основании полученных соотношений и с учетом материала § 9.13 запишем основные расчетные формулы для определения r_2 и x_2 двухклеточных роторов с общими замыкающими кольцами (двухклеточные роторы с литыми обмотками и роторы с фигурными пазами).

При $s_0 < s \le s_н$ активное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$r_2 = r_{э.х.х} + r_0 = r_в(1 - \alpha) + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2} \tag{9.295}$$

где α — по (9.290), причем

$$\left.\begin{aligned} r_В &= \rho_{BV}\frac{l_В}{q_В} \\ r_Н &= \rho_{HV}\frac{l_Н}{q_Н} \end{aligned}\right\} \tag{9.296}$$

ρ_{BV}, ρ_{HV}, l_V, $l_Н$, $q_В$, $q_Н$ — удельные сопротивления при расчетной температуре, длины и площади поперечных сечений стержней верхней и нижней клеток; при литых обмотках с общими замыкающими кольцами в $\rho_{BV} = \rho_{HV}$ и, $l_V = l_Н$; Δ — см. (9.70).

Индуктивное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$x_2 = x_{п.в} + x_0 + x_{э.х.х}, \tag{9.297}$$

где

$$\left.\begin{aligned} x_{П.В} &= 7{,}9 f_1 l_\delta \lambda_{П.В} \bullet 10^{-6} \\ x_0 &= 7{,}9 f_1 l_\delta (\lambda_{Д2} + \lambda_{КЛ2}) \bullet 10^{-6} \\ x_{Э.ХХ} &= x_{П.Н}\alpha^2 = 7{,}9 f_1 l_\delta \lambda_{П.Н}\alpha^2 \bullet 10^{-6} \end{aligned}\right\} \tag{9.298}$$

С учетом (9.298)

$$x_2 = 7{,}9 f_1 l'_\delta (\lambda_{п.в} + \lambda_{п.н}\alpha^2 + \lambda_{д2} + \lambda_{кл2}) 10^{-6}, \tag{9.299}$$

где $\lambda_{п.в}$, и $\lambda_{п.н}$ — коэффициенты магнитных проводимостей потоков пазового рассеяния соответственно верхней и нижней клеток, которые определяются в зависимости от конфигурации пазов верхней и нижней клеток по формулам табл. 9.34; $\lambda_{д2}$ — коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора, который определяется по (9.180); $\lambda_{кл2} = \lambda_{л2}$ — коэффициент магнитной проводимости участков замыкающего кольца, приведенный к току ротора, который определяется по (9.178) или по (9.179).

Для пусковых режимов ($s \ge s_н$) $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$ роторов с общими замыкающими кольцами рассчитывают по следующим формулам.

Активное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$r_{2\xi} = r_в(1 - \alpha)k'_r + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2} = r_в(1 - \alpha k'_x) + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2} \tag{9.300}$$

Таблица 9.34. Расчетные формулы для определения коэффициента магнитной проводимости пазового рассеянна двухклеточных роторов и роторов с фигурными пазами

Рисунок	Расчетные формулы	
	$\lambda_{п.в}$	$\lambda_{п.н}$
9.66, а	$\left(0{,}785-\dfrac{b_ш}{2b_в}\right)k_{Д.В}+\dfrac{h_ш}{b_ш}$	$\left(0{,}785-\dfrac{b_0}{2b_н}\right)k_{Д.В}+\dfrac{h_0}{b_0}$
9.66, б	$\left(0{,}785-\dfrac{b_ш}{2b_в}\right)k_{Д.В}+\dfrac{h_ш}{b_ш}$	$\dfrac{h_н}{3b_н}k_{Д.Н}+\dfrac{h_0}{b_0}$
9.66, в	$\left(0{,}785-\dfrac{b_ш}{2b_в}\right)k_{Д.В}+\dfrac{h_ш}{b_ш}$	$\left[\dfrac{h_н}{3b_н}\left(1-\dfrac{\pi b_н^2}{8q_н}\right)^2+0{,}66-\dfrac{b_0}{2b_н}\right]k_{Д.Н}+\dfrac{h_0}{b_0}$
9.66, г	$\left(0{,}785-\dfrac{b_ш}{2b_в}\right)k_{Д.В}+\dfrac{h_ш}{b_ш}$	$\left[\dfrac{h_н}{3b_н}\left(1-\dfrac{\pi b_н^2}{8q_н}\right)^2+0{,}66-\dfrac{b_0}{2b_н}\right]k_{Д.Н}+\dfrac{h_0}{b_0}$
9.66, д	$\dfrac{h_в}{2b_в}k_{Д.В}+\dfrac{h_ш}{b_ш}$	$\left(0{,}785-\dfrac{b_в}{2b_н}\right)k_{Д.В}$
9.66, е	$\left(\dfrac{h_в}{2b_в}+\dfrac{3h_в}{b+2b_ш}\right)k_{Д.В}+\dfrac{h_ш}{b_ш}$	$\left[\dfrac{h_н}{3b_н}\left(1-\dfrac{\pi b_н^2}{8q_н}\right)^2+0{,}66-\dfrac{b_в}{2b_н}\right]k_{Д.Н}$

Примечания: 1. При закрытых пазах ротора коэффициент магнитной проводимости шлица $h_ш/b_ш$ рассчитывать в соответствии с указаниями, приведенными в § 9.10 (см. рис. 9.52).

2. При расчете параметров холостого хода и номинального режима принимать $k_{д.в} = k_{д.н} = 1$.

Индуктивное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$x_{2\xi}\quad 7{,}9 f_1 l'_\delta(\lambda_{п.в}+\lambda_{п.н}\alpha^2 k'_x+\lambda_{кл2}+\lambda_д)\,10^{6} \tag{9.301}$$

В этих формулах k'_x и k'_r рассчитывают по (9.293) и (9.294), в которых α и β определяют по (9.290), а $\lambda_{п.в}$ и $\lambda_{п.н}$ Для пазов, показанных на рис. 9.66, — по формулам табл. 9.34.

Предполагают, что плотность тока в пределах сечения каждого из стержней постоянна. При $\xi_в > 1$ и $\xi_н > 1$ можно несколько повысить точность расчета, учитывая влияние эффекта вытеснения тока на сопротивления каждого из стержней. Для этого по формулам, приведенным в § 9.13, последовательно рассчитывают для верхнего стержня $\xi_в$, $k_{rв}$, $r_{в\xi}$, $k_{д.в}$, $x_{в\xi}$ и для нижнего стержня $\xi_н$, $k_{rн}$, $r_{н\xi}$, $k_{д.н}$, $x_{п.н\xi}$, после чего определяют

$$\alpha_\xi=\frac{r_{В\xi}}{r_{В\xi}+r_{Н\xi}} \qquad \beta_\xi=\frac{x_{П.Н\xi}}{r_{В\xi}+r_{Н\xi}} \tag{9.302}$$

подставляя эти величины вместо α и β последующие формулы, находят $k'_{x\xi}$ и $k'_{r\xi}$ и по (9.300) и (9.301) рассчитывают $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$ с учетом влияния эффекта вытеснения

тока на сопротивление каждого из стержней обмотки при принятых значениях s. Обычно $k_{тв}$ и $k_{тн}$ близки к единице, и уточнения расчета, связанного с влиянием эффекта вытеснения тока на каждый из стержней, не требуется.

Для уточнения расчета пускового момента и тока следует учесть также влияние насыщения от полей рассеяния на проводимость паза верхней клетки. Расчет проводят аналогично изложенному в § 9.13.

При расчете сопротивлений роторов с раздельными замыкающими кольцами (двухклеточные роторы с обмоткой из вставных стержней) аналогично принятому ранее допущению ($x_{в.н}$ = $x_{п.в}$) принимают, что индуктивное сопротивление участков замыкающего кольца верхней клетки приблизительно равно сопротивлению и взаимоиндуктивности участков колец верхней и нижней клеток. Такое допущение позволяет использовать ту же схему замещения (см. рис. 9.65), но с несколько измененными значениями ее параметров. В схеме замещения ротора с раздельными кольцами:

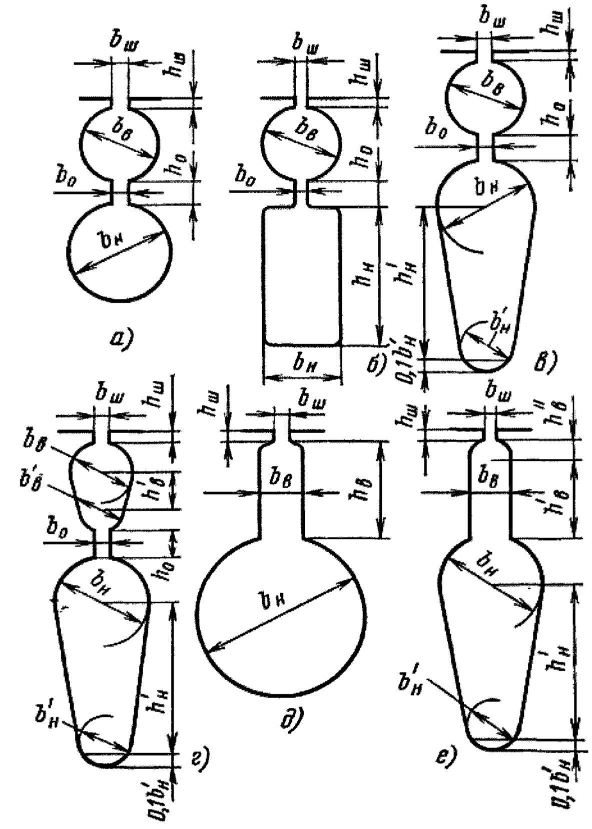


Рис. 9.66. К расчету коэффициентов магнитной проводимости пазового рассеяния двухклеточных короткозамкнутых роторов с двойной беличьей клеткой и с фигурными пазами: а—г — пазы роторов с двойной беличьей клеткой; д, е — фигурные пазы

сумма активных сопротивлений стержня и участков замыкающих колец верхней клетки

$$R_в = r_в + \frac{2r_{кл.в}}{\Delta^2} \qquad (9.303)$$

сумма активных сопротивлений стержня и участков замыкающих колец нижней клетки

$$R_н = r_н + \frac{2r_{кл.н}}{\Delta^2} \qquad (9.304)$$

сумма индуктивных сопротивлений пазового рассеяния и участков замыкающих колец верхней клетки

$$x_в = x_{п.в} + x_{кл.в} = 7{,}9 f_1 l'_\delta (\lambda_{п.в} + \lambda_{кл.в}) 10^{-6}\,; \qquad (9.305)$$

сумма индуктивных сопротивлений пазового рассеяния и участков замыкающих колец нижней клетки

$$x_н = x_{п.н} + x_{кл.н} = 7{,}9 f_1 l'_\delta (\lambda_{п.н} + \lambda_{кл.н}) 10^{-6} . \qquad (9.306)$$

В этих выражениях $\lambda_{п.в}$ и $\lambda_{п.н}$ — коэффициенты магнитной проводимости пазового рассеяния соответственно верхней и нижней клеток (рассчитываются в зависимости от конфигурации пазов по данным табл. 9.33); $\lambda_{кл.в}$, $\lambda_{кл.н}$ — коэффициенты магнитной проводимости участков замыкающих колец [рассчитываются по (9.178) или (9.179)].

Общее сопротивление для обеих параллельных ветвей схемы замещения

$$z_0 = x_0 = x_д = 7{,}9 f_1 l'_\delta \lambda_Д 10^{-6}., \qquad (9.307)$$

где $\lambda_д$ — коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния, рассчитываемый по (9.180).

Сопротивления r_2 и x_2 роторов с раздельными замыкающими кольцами для холостого хода и номинального режима работы, Ом,

$$r_2 = r_{э.х.х} = R_в (1 - \alpha); \qquad (9.308)$$

$$x_2 = x_в + x_{э.х.х} + x_0 = 7{,}9 f_1 l'_\delta (\lambda_{п.в} + \lambda_{п.н} \alpha^2 + \lambda_{кл.в} + \lambda_д) 10^{6} , \qquad (9.309)$$

где

$$\alpha = \frac{R_в}{R_н + R_в}$$

Сопротивления $r_{2\xi}$ и $x_{2\xi}$, для пусковых режимов работы ($s >> s_н$), Ом,

$$r_{2\xi} = r_э = R_в (1 - \alpha k'_x); \qquad (9.310)$$

$$x_{2\xi} = 7{,}9 f_1 l'_\delta (\lambda_{п.в} + \lambda_{п.н} \alpha^2 k'_x + \lambda_{кл.в} + \lambda_д) 10^{6}, \qquad (9.311)$$

где $k'_х$ определяется по (9.293) при

$$\beta = X_н / (R_в + R_н). \qquad (9.312)$$

Эффект вытеснения тока в каждом из стержней и влияние насыщения полями рассеяния на параметры ротора учитывают так же, как и для роторов с общими замыкающими кольцами.

Приведенный метод расчета параметров двухклеточных роторов и роторов с фигурными пазами, как и другие аналогичные ему методы, учитывающие индуктивную связь только между полными токами каждого из стержней, являются приближенными, однако они находят применение в расчетной практике благодаря своей простоте. Более точный метод расчета параметров ротора с произвольной конфигурацией стержней рассматривается в спецкурсах [7].

9.15. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО И ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

На первоначальной стадии проектирования достаточно достоверную оценку теплового режима двигателя дает приближенный метод теплового расчета, основанный на упрощенном представлении о характере тепловых связей между элементами электрической машины. В нем используют средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности и теплопроводности изоляции, характерные для определенной конструкции и технологии производства двигателей данного типа.

Для расчета нагрева асинхронных машин, спроектированных на базе серий 4А и АИ, берутся усредненные коэффициенты теплоотдачи с поверхности и теплопроводности изоляции в пазовой и лобовой частях обмоток.

Расчет нагрева проводят, используя значения потерь, полученных для номинального режима, но потери в изолированных обмотках статора и фазного ротора несколько увеличивают по сравнению с расчетными, предполагая, что обмотки могут быть нагреты до предельно допустимой для принятого класса изоляции температуры: при классе нагревостойкости изоляции В — до 120° С, при классе нагревостойкости изоляции F — до 140° С и при классе нагревостойкости изоляции Н — до 165° С. При этом коэффициент увеличения потерь k_ρ по сравнению с полученными для расчетной температуры составит для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости В $k_\rho = \rho_{120}/\rho_{75} = 1{,}15$, для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости F $k_\rho = \rho_{140}/\rho_{115} = 1{,}07$, для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости Н $k_\rho = \rho_{165}/\rho_{115} = 1{,}45$.

Электрические потери в обмотке статора делятся на потери в пазовой части $P_{э.п}$, и потери в лобовых частях катушек $P_{э.л1}$:

$$P'_{э.п} = k_\rho P_{э1} \frac{2l_1}{l_{ср1}}; \qquad (9.313)$$

$$P'_{э.л1} = k_\rho P_{э1} \frac{2l_1}{l_{ср1}} \qquad (9.314)$$

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины, ° С,

$$\Delta\upsilon_{пов1} = K \frac{P_{э.п} + P_{ст.осн}}{\pi D l_1 \alpha_1} \qquad (9.315)$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи с поверхности, определяемый по рис. 9.67 и 9.68 в зависимости от исполнения машины; К — коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду (принимают по табл. 9.35).

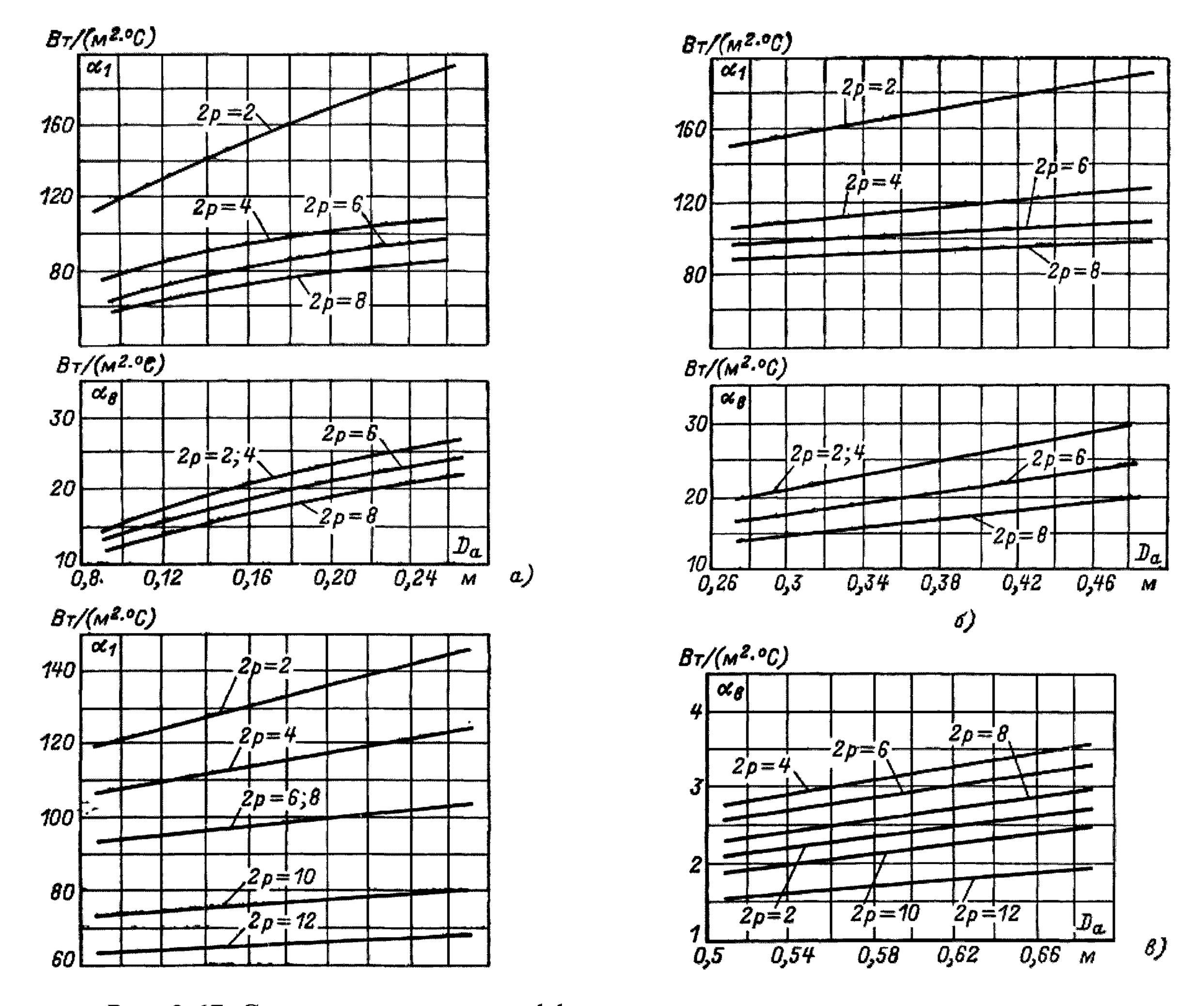


Рис. 9.67. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха $\alpha_в$, для асинхронных двигателей исполнения IP44: а — при h < 160 мм; б — при h = 160...250 мм; в — при h ≥ 280 мм (для двигателей с продуваемым ротором)

Таблица 9.35 Средние значения коэффициента К

Исполнение двигателя по способу зашиты	Число полюсов двигателя 2р					
	2	4	6	8	10	12
IP44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0.84	0.80	0,78	0,76	0.74	0.72

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора,°С,

$$\Delta\vartheta_{из.п} = \frac{P_{э.п}}{Z_1 \Pi_п l_1}\left(\frac{b_{из}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda_{экв}}\right), \qquad (9.316)$$

где $\Pi_{п1}$ — расчетный периметр поперечного сечения паза статора, равный для полузакрытых трапецеидальных пазов (см. рис. 9.29, а):

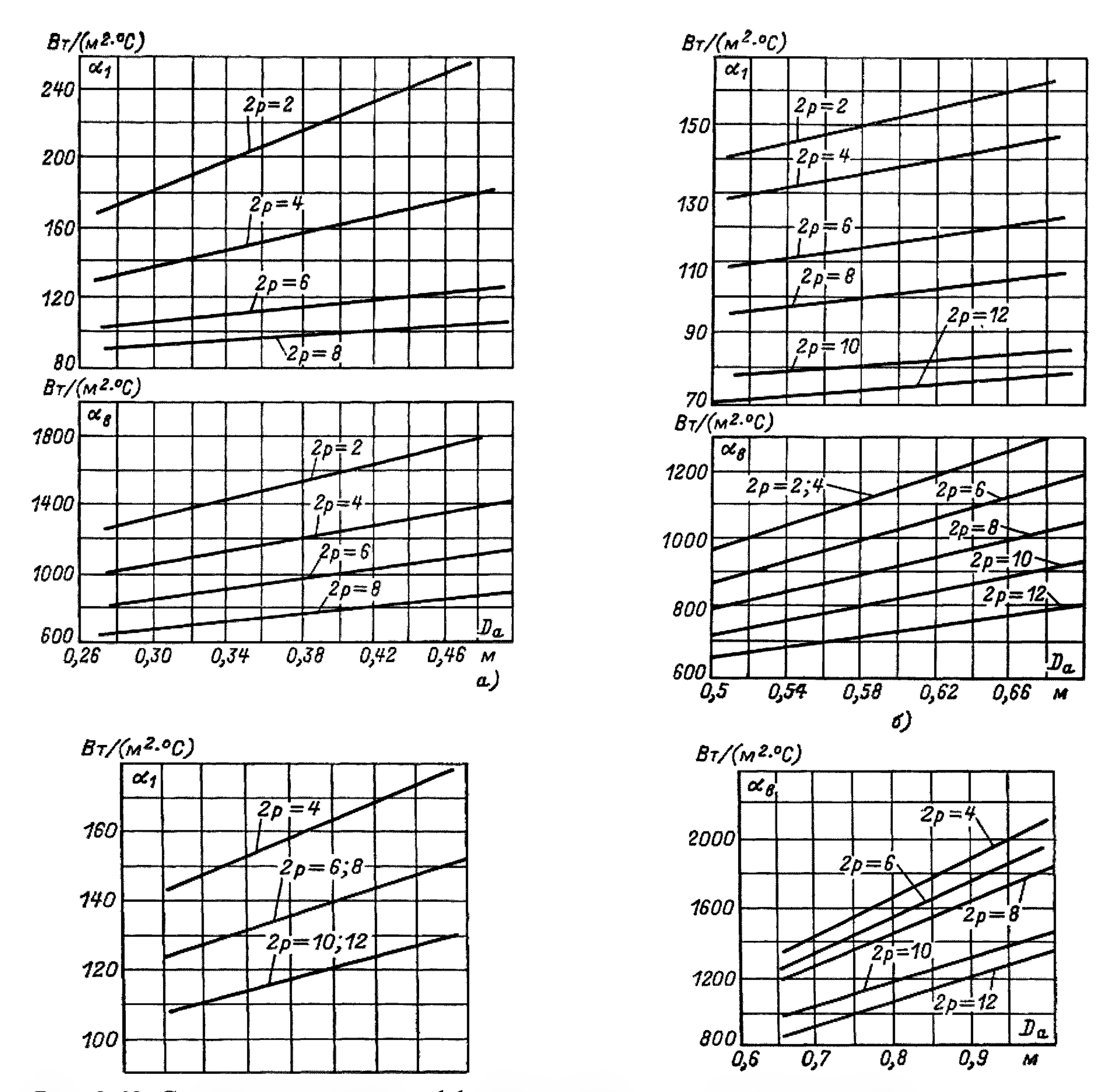


Рис. 9.68. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха $\alpha_в$ для асинхронных двигателей исполнения IP23:
а — при h = 160...250 мм, $U_{ном}$ = 660 В; б — при h ≥ 280 мм, $U_{ном}$ = 660 В; в — при $U_{ном}$ = 6000 В

$$\Pi_{п1} = 2h_{п.к} + b_1 + b_2 \qquad (9.317)$$

($h_{п.к}$, b_1, b_2 — размеры паза в штампе); для прямоугольных открытых и полуоткрытых пазов (см. рис. 9.28):

$$\Pi_{п1} = 2(h_п + b_п);$$

$b_{из1}$ — односторонняя толщина изоляции в пазу; для всыпной обмотки $b_{из1}$ берется по соответствующим таблицам (см. гл. 3). Для обмоток из прямоугольного провода

$$b_{из1} = (b_п - n_{эл} b)0,5 \qquad (9.318)$$

где $n_{эл}$ и b — число и ширина неизолированных элементарных проводников, расположенных в одном слое по ширине паза; $\lambda_{экв}$ — средняя эквивалентная

теплопроводность пазовой изоляции; для классов нагревостойкости B, F и H $\lambda_{экв}$ = 0,16 Вт/(м°С); $\lambda'_{экв}$, — среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки из эмалированных проводников с учетом неплотности прилегания проводников друг к другу; значение $\lambda'_{экв}$ берется по рис. 9.69; для обмоток из прямоугольного провода в (9.316) принимают $\frac{b_1+b_2}{16\lambda_{экв}}=0$

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей

$$\Delta\vartheta_{из.л1}=\frac{P_{э.л1}}{2Z_1\Pi_{л1}l_{л1}}\left(\frac{b_{из.л1}}{\lambda_{экв}}+\frac{h_{п1}}{12\lambda_{экв}}\right), \tag{9.319}$$

где $\Pi_{л1}$ — периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки; $\Pi_{л1}\approx\Pi_{п1}$; $b_{из.л1}$ — односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки (по табл. гл. 3). При отсутствии изоляции в лобовых частях $b_{из.л1}$ = 0; $\lambda'_{экв}$ для всыпной обмотки определяется по рис. 9.69. Для катушек из прямоугольного провода принимают $h_{п1}/(12\,\lambda'_{экв})=0$.

Превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины, ° С,

$$\Delta\vartheta_{пов.л1}=\frac{KP_{э.л1}}{2\pi D l_{выл1}\alpha_1} \tag{9.320}$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, ° С,

$$\Delta\vartheta_1=[(\Delta\vartheta_{пов1}+\Delta\vartheta_{из.п1})2l_1+(\Delta\vartheta_{из.л1}+\Delta\vartheta_{пов.л1})2l_{л1}]/l_{ср.1} \tag{9.321}$$

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды определяется в предположении, что температура корпуса равна температуре воздуха внутри машины. При этом условии

$$\Delta\vartheta_в=\sum P_в/(S_{кор}\alpha_в) \tag{9.322}$$

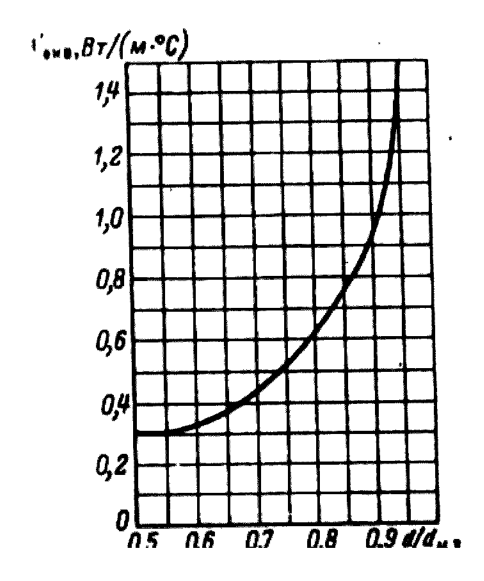
где $\sum P_в$ — сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, Вт; $\alpha_В$ — коэффициент подогрева воздуха, Вт/(м^2•С), учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины (см. рис. 9.67, 9.68); $S_{кор}$ -эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м^2. Для двигателей со степенью защиты IP23

$$\sum P_в=\sum P-(1-K)(P_{э.л1}+P_{ст.осн}), \tag{9.323}$$

где

$$\sum P=\sum P+(k_p-1)(P_{э1}+P_{э2}); \tag{9.324}$$

$\sum P$ — сумма всех потерь в двигателе при номинальном режиме и расчетной температуре.



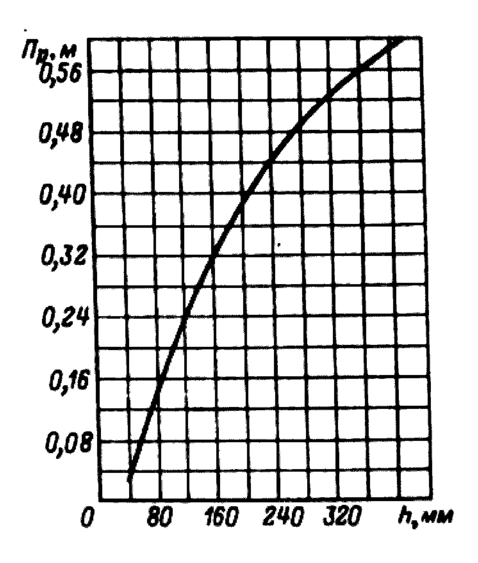


Рис. 9.69. Средние значения коэффициентов теплопроводности $\lambda'_{экв}$ внутренней изоляции в катушках обмотки из круглого эмалированного провода

Рис. 9.70. Средние значения периметра поперечного сечения ребер корпуса асинхронных двигателей

Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м^2,

$$S_{кор} = \pi D_a (l_1 + 2 l_{выл1}). \tag{9.325}$$

Для двигателей со степенью защиты IP44 при расчете $\sum P'_в$ не учитывают также мощность, потребляемую наружным вентилятором, которая составляет примерно 0,9 суммы полных механических потерь:

$$\sum P'_в = \sum P' - (1 - K)(P'_{э.п1} + P_{ст.осн}) - 0,9 P_{мех}, \tag{9.326}$$

где $\sum P'$—по (9.324).

При расчете $S_{кор}$ учитывают поверхность ребер станины:

$$S_{кор} = (\pi D_a + 8 П_р)(l_1 + 2 l_{выл1}), \tag{9.327}$$

где $П_р$—условный периметр поперечного сечения ребер корпуса двигателя; значение $П_р$ может быть принято приближенно по кривой рис. 9.70.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды,°С,

$$\Delta \vartheta_1 = \Delta \vartheta_1 + \Delta \vartheta_в, \tag{9.328}$$

Из-за приближенного характера расчета $\Delta \vartheta_1$, должно быть, по крайней мере, на 20 % меньше, чем допускаемое превышение температуры для принятого класса изоляции (см. табл. 7.1).

Превышение температуры обмотки фазного ротора определяется аналогично в следующей последовательности.

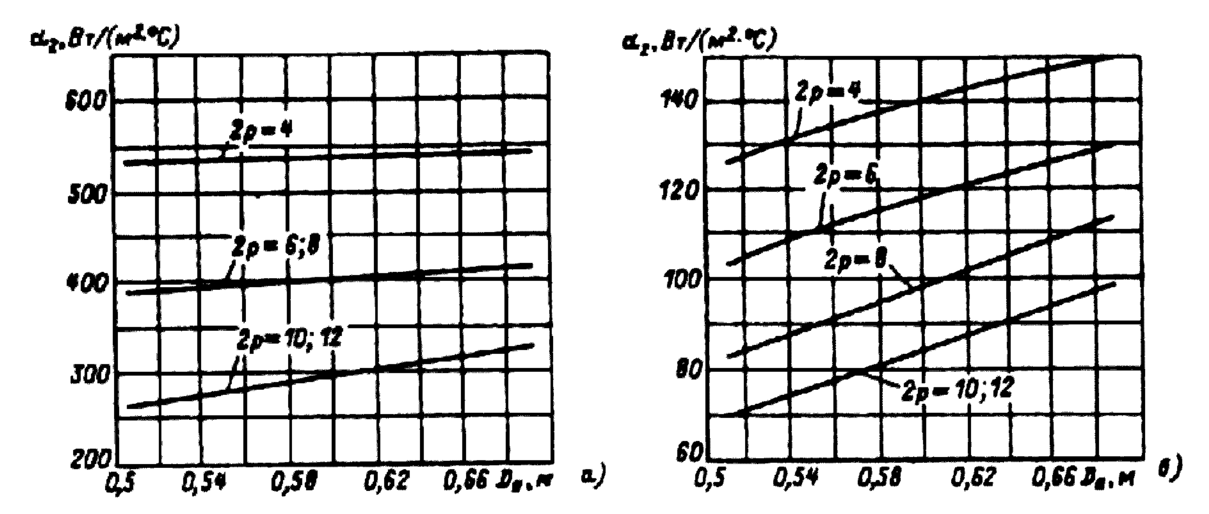


Рис. 9.71. Средние значения коэффициента теплоотдачи с поверхности от фазных роторов асинхронных двигателей с $U_{ном}$ = 660 В: а — исполнения IP44 с продуваемым ротором; б — исполнения IP23

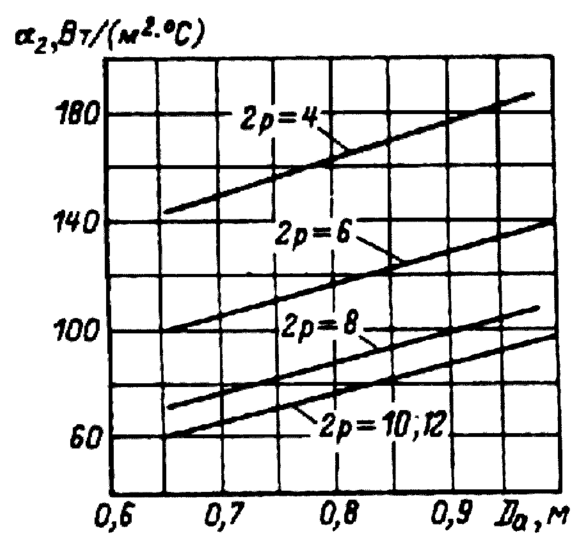


Рис. 9.72. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_2 фазных роторов асинхронных двигателей с $U_{ном}$ = 6000 В исполнения IP23

Превышение температуры магнитопровода ротора над температурой воздуха внутри машины,°С,

$$\Delta\vartheta_{ПОВ2} = \frac{P_{Э.П2}}{\pi D_2 l_2 \alpha_2}, \qquad (9.329)$$

где α_2 — коэффициент теплоотдачи, определяемый по рис. 9.71 и 9.72; $P'_{э.п2}$ — электрические потери в пазовой части обмотки ротора:

$$P_{Э.П2} = k_p P_{Э2} \frac{2 l_2}{l_{СР2}} \qquad (9.330)$$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки ротора, °С

$$\Delta\vartheta_{ИЗ.П2} = \frac{P_{Э.П2} b_{ИЗ.П2}}{Z_2 П_{П2} l_2 \lambda_{ЭКВ}}, \qquad (9.331)$$

где $П_{п2}$ — периметр паза ротора. Для прямоугольных пазов

$$П_{п2} = 2(h_{п2} + b_{п2}). \qquad (9.332)$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины, ° С,

$$\Delta\vartheta_{ПОВ.Л2} = \frac{P_{Э.Л2}}{2\pi D_2 b_{ВЫЛ2} \alpha_2}, \qquad (9.333)$$

где $P'_{эл2}$ — электрические потери в лобовых частях обмотки, Вт:

$$P'_{эл2} \quad k_p P_{Э1} \frac{2 l_{Л2}}{l_{СР2}} \qquad (9.334)$$

Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки ротора, ° С,

$$\Delta\vartheta_{ИЗ.Л2} = \frac{P_{Э.Л2} b_{ИЗ.Л2}}{2 Z_2 П_{Л2} l_{Л2} \lambda_{ЭКВ}} \qquad (9.335)$$

где $П_{л2}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки: $П_{л2} = П_{п2}$; $b_{из.л2}$ — односторонняя толщина изоляции лобовых частей (по табл. гл. 3).

Среднее превышение температуры обмотки ротора над температурой воздуха внутри двигателя, ° С,

$$\Delta\vartheta_2 = \frac{(\Delta\upsilon_{ПОВ2} + \Delta\upsilon_{ИЗ.П2})2 l_2 + (\Delta\vartheta_{ПОВ.Л2} + \Delta\vartheta_{ПОВ.Л2})2 l_{Л2}}{l_{СР2}} \qquad (9.336)$$

Среднее превышение температуры обмотки ротора над окружающей средой, ° С,

$$\Delta\vartheta_2 = \Delta\vartheta_2 + \Delta\nu_B. \qquad (9.337)$$

Вентиляционный расчет асинхронных двигателей, так же как и тепловой на первоначальном этапе проектирования, может быть выполнен приближенным методом, который заключается в сопоставлении расхода воздуха, необходимого для охлаждения двигателя и расхода, который может быть получен при данной конструкции и размерах двигателя.

Для двигателей со степенью защиты IP23 требуемый для охлаждения расход воздуха, м^3/с,

$$Q_в - \sum P'_в / (1100 \Delta\vartheta_B), \qquad (9.338)$$

где $\sum P'_в$ — по (9.326); $\Delta\vartheta_B$ — превышение температуры выходящего из двигателя воздуха над температурой входящего; приближенно $\Delta\vartheta_B = 2\,\Delta\nu'_в$, где $\Delta\nu'_в$ — по (9.322).

Расход воздуха, который может быть получен при данных размерах двигателя, оценивается по эмпирической формуле

$$Q'_в \quad m(n_K b_K + 0{,}1)\frac{n}{100} D^2_a, \qquad (9.339)$$

где $n_к$ и $b_к$ — число и ширина, м, радиальных вентиляционных каналов; n — частота вращения двигателя, об/мин; m' — коэффициент (m' — 2,6 для двигателя с 2р = 2; m' = 3,15 для двигателя с2р ≥ 4).

Формула (9.339) приближенно учитывает суммарное действие всех нагнетательных элементов в двигателе: лопаток на замыкающих кольцах литой клетки, вылетов стержней при сварных клетках короткозамкнутых роторов, лобовых частей фазных роторов, вентиляционных распорок в радиальных каналах и др.

Для двигателей со степенью защиты IP44 требуемый для охлаждения расход воздуха, м^3/с,

$$Q_в \quad k_m \sum P'_в /(1100 \Delta \vartheta_в), \qquad (9.340)$$

где k_m — коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором:

$$k_m \quad m' \sqrt{\frac{n}{100} D_a} \qquad (9.341)$$

Коэффициент $m' = 2,6$ для двигателей с 2р = 2 при h ≤ 132 мм и $m' = 3,3$ при h ≥ 160 мм; $m' = 1,8$ для двигателей с 2р ≥ 4 при h ≤ 132 мм и $m' = 2,5$ при h ≥ 160 мм.

Расход воздуха, м^3/с, обеспечиваемый наружным вентилятором, может быть приближенно определен по следующей формуле:

$$Q'_в \quad 0,6\, D^3_a \frac{n}{100}. \qquad (9.342)$$

Расход воздуха $Q'_в$ должен быть больше требуемого для охлаждения машины $Q_в$.

На этом, если не требуется более детального определения температуры отдельных элементов, расчет асинхронного двигателя может быть закончен. Для уточненного расчета теплового режима двигателя могут быть использованы методы, рассмотренные в гл. 7.

9.16. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

9.16.1 Расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Техническое задание

Спроектировать асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором: P_2 = 15 кВт, U = 220/380 В, 2р = 4; конструктивное исполнение IM1001; исполнение по способу защиты IP44; способ охлаждения IC0141; климатическое исполнение и категория размещения УЗ, класс нагревостойкости изоляции F.

Выбор главных размеров

1. Высота оси вращения (предварительно) по рис. 9.18, *а* h = 0,17 м. Принимаем ближайшее стандартное значение h = 160 мм; D_a = 0,272 м (см. табл. 9.8).
2. Внутренний диаметр статора $D = k_D D_a = 0{,}68 \cdot 0{,}272 = 0{,}185$ м, k_D = по табл. 9.9.
3. Полюсное деление $\tau = \pi D/(2p) = \pi\, 0{,}185/4 = 0{,}145$ м.
4. Расчетная мощность по (9.4)

$$P' \quad mIE \quad P_2 \frac{k_E}{\eta \cos\varphi} = \frac{15 \cdot 10^3 \cdot 0{,}975}{0{,}88 \cdot 0{,}88} = 18\,885 \approx 18\,900 \text{ В} \cdot \text{А}$$

(k_E — по рис. 9.20; η и cosφ — по рис. 9.21, а).

5. Электромагнитные нагрузки (предварительно по рис. 9.22, б)

$A = 32 \cdot 10^3$ А/м; B_δ = 0,75 Тл

6. Обмоточный коэффициент (предварительно для однослойной обмотки) $k_{об1}$ = 0,95.

7. Расчетная длина магнитопровода по (9.6)

$$l_\delta = \frac{P'}{D^2 \Omega k_B k_{об1} A B_\delta} = \frac{18900}{1{,}1 \cdot 0{,}185^2 \cdot 157 \cdot 0{,}95 \cdot 32 \cdot 10^3 \cdot 0{,}75} = 0{,}139 \approx 0{,}14 \text{ м}$$

(по (9.5) $\Omega = 2\pi f / p = 2\pi \cdot 50/2 = 157$ рад/с].

8. Отношение $\lambda = l_\delta / \tau = 0{,}14/0{,}145 = 0{,}97$. Значение $\lambda = 0{,}97$ находится в допустимых пределах (см. рис. 9.25).

Определение Z_1, w_1 и площади поперечного сечения провода обмотки статора

9. Предельные значения t_{z1} (по рис. 9.26): $t_{z1max} = 15$ мм; $t_{z1min} = 12$ мм.

10. Число пазов статора по (9.16)

$$Z_{1min} = \frac{\pi D}{t_{Z1max}} = \frac{\pi \cdot 0{,}185}{0{,}015} = 39$$

$$Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{Z1min}} = \frac{\pi \cdot 0{,}185}{0{,}012} = 48$$

Принимаем $Z_1 = 48$, тогда $q_1 = Z_1/(2pm)$ - $48/(4 \cdot 3) = 4$. Обмотка однослойная.

11 . Зубцовое деление статора (окончательно)

$$t_{Z1} = \frac{\pi D}{2pmq} = \frac{\pi \cdot 0{,}185}{4 \cdot 3 \cdot 4} = 12{,}1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

12. Число эффективных проводников в пазу [предварительно, при условии $a = 1$ по (9.17)]

$$u'_п = \frac{\pi D A}{I_{1ном} Z_1} = \frac{\pi \cdot 0{,}185 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{29{,}3 \cdot 48} = 13{,}2$$

(по 9.18)

$$I_{1ном} = \frac{P_2}{m U_{1ном} cos\varphi\eta} = \frac{15 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}88 \cdot 0{,}88} = 29{,}3 \text{ А.}$$

13. Принимаем $a = 1$, тогда по (9.19) $u_п$ $a u'_п = 13$ проводников.

14. Окончательные значения:

число витков в фазе по (9.20)

$$w_1 = \frac{u_п Z_1}{2am} = \frac{13 \cdot 48}{2 \cdot 3} = 104$$

линейная нагрузка по (9.21)

$$A = \frac{2 I_{1ном} w_1 m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 29{,}3 \cdot 104 \cdot 3}{\pi \cdot 0{,}185} = 31{,}5 \cdot 10^3 \text{ А/м,}$$

магнитный поток по (9.22)

$$\Phi = \frac{k_E U_{1н}}{4 k_B w_1 k_{об1} f_1} = \frac{0{,}975 \cdot 220}{4{,}44 \cdot 104 \cdot 0{,}958 \cdot 50} = 9{,}7 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

(для однослойной обмотки с $q = 4$ по табл. 3.16 $k_{об1} = k_{р1} = 0{,}958$; для $D_a = 0{,}272$ м по рис. 9.20 $k_E = 0{,}975$);

индукция в воздушном зазоре по (9.23)

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{D l_\delta} = \frac{2 \cdot 0{,}0097}{0{,}185 \cdot 0{,}14} = 0{,}749 \text{ Тл}$$

Значения A и B_δ находятся в допустимых пределах (см. рис. 9.22, б).

15. Плотность тока в обмотке статора (предварительно) по (9.25). A по п. 14 $31{,}5 \cdot 10^3$ А/м

$$J_1 = \frac{AJ_1}{A} = \frac{180 \cdot 10^9}{31500} = 5{,}71 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

($AJ_1 = 180 \cdot 10^9$ по рис. 9.27, б).

16. Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно) по (9.24), a = 1.

$$q_{эф1} = \frac{I_{1ном}}{aJ_1} = \frac{29{,}3}{5{,}71\cdot 10^6} = 5{,}13\cdot 10^{-6}\ м^2 = 5{,}13\ мм^2.$$

17. Сечение эффективного проводника (окончательно): принимаем $n_{эл} = 3$, тогда $q_{эл} = q_{эф}/n_{эф} = 5{,}13/3 = 1{,}71$ мм^2. Принимаем обмоточный провод марки ПЭТВ (см. приложение 3), $d_{эл} = 1{,}5$ мм, $q_{эл} = 1{,}767$ мм^2, $q_{э.ср} = n_{эл}\, q_{эл} = 3 \cdot 1{,}767 = 5{,}3$ мм^2.

18. Плотность тока в обмотке статора (окончательно) по (9.27)

$$J_1 = \frac{I_{1н}}{aq_{эл}n_{эл}} = \frac{29{,}3}{1{,}767\cdot 3} = 5{,}53\ А/мм^2.$$

Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Паз статора определяем по рис. 9.29, *а* с соотношением размеров, обеспечивающих параллельность боковых граней зубцов.

19. Принимаем предварительно по табл. 9.12 $B_{Z1} = 1{,}9$ Тл; $B_a = 1{,}6$ Тл, тогда по (9.37)

$$b_{Z1} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{B_{Z1} l_{ст1} k_с} = \frac{0{,}749\cdot 12{,}1\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}14}{1{,}9\cdot 0{,}14\cdot 0{,}97} = 4{,}9\cdot 10^{-3}\ м = 4{,}9\ мм$$

(по табл. 9.13 для оксидированной стали марки 2013 $k_с = 0{,}97$);

по (9.28)

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a l_{ст1} k_с} = \frac{9{,}7\cdot 10^{-3}}{2\cdot 1{,}6\cdot 0{,}14\cdot 0{,}97} = 22{,}3\cdot 10^{-3}\ м = 22{,}3\ мм.$$

20. Размеры паза в штампе: $b_ш = 3{,}7$ мм; $h_ш = 1$ мм; 45° (см. рис. 9.29, *а*);

по (9.38)

$$h_п = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0{,}272 - 0{,}185}{2} - 0{,}0223 = 0{,}0218\,м = 21{,}2\ м = 21{,}2\ мм;$$

по (9.40)

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_ш - b_ш) - Z_1 b_{Z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi(185 + 2 - 3{,}7) - 48\cdot 4{,}9}{48 - \pi} = 7{,}59\ мм \approx 7{,}6\ мм$$

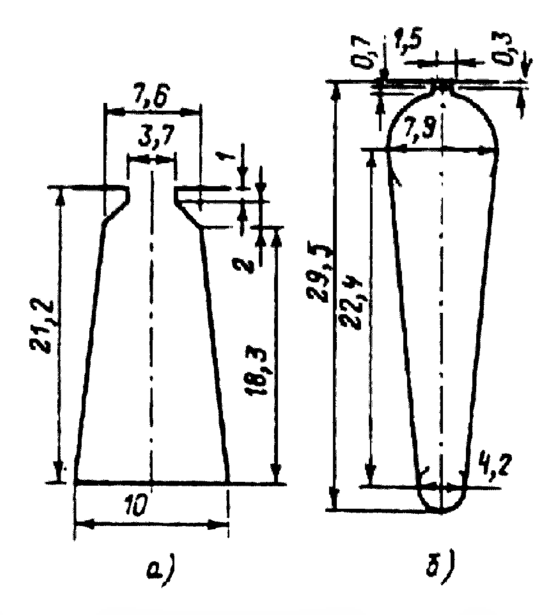


Рис. 9.73. Пазы спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором (P_2 =15 кВт, 2p = 4, $U_{ном}$ =220/380 В)

по (9.39)

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_п)}{Z_1} - b_{Z1} = \frac{\pi(185 + 2\cdot 21{,}2)}{48} - 4{,}9 =$$

$= 9{,}98 = 10$ мм^2;

по (9.42)—(9.45)

$$h_{п.к} = h_п - (h_ш + \frac{b_2 - b_ш}{2}) =$$

$$21{,}2 - (1 + \frac{7{,}6 - 3{,}7}{2}) = 18{,}25 \approx 18{,}3\,мм$$

Паз статора показан на рис. 9.73, *а*.

21. Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку:

$b'_1 = b_1 - \Delta b_п = 7{,}6 - 0{,}2 = 7{,}4$ мм

$b'_2 = b_2 - \Delta b_п = 10 - 0{,}2 = 9{,}8$ мм

$b'_{п.к} = h_{п.к} - \Delta h = 18{,}3 - 0{,}2 = 18{,}1$ мм.

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки по (9.48)

$$S'_{п} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{п.к} - (S_{из} + S_{пр}) = \frac{7{,}4 + 9{,}8}{2} 18{,}1 - 24 = 131{,}7$$

[площадь поперечного сечения прокладок $S_{пр}$ = 0; площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу

$S_{из} = b_{из}(2h_{п} + b_1 + b_2) = 0{,}4(2 \cdot 21{,}2 + 7{,}6 + 10) = 24$ мм^2,

где односторонняя толщина изоляции в пазу $b_{из}$ = 0,4 мм — по табл. 3.1].

22. Коэффициент заполнения паза по (3.2):

$$k_{з} = \frac{d^2_{из} u_{п} n_{эл}}{S'_{п}} = \frac{1{,}585^2 \cdot 13 \cdot 3}{138{,}15} = 0{,}74$$

Полученное значение $k_з$ допустимо для механизированной укладки обмотки.

Расчет ротора

23. Воздушный зазор (по рис. 9.31) δ = 0,5 мм.

24. Число пазов ротора (по табл. 9.18) Z_2 = 38.

25. Внешний диаметр ротора $D_2 = D - 2\delta = 0{,}185 - 2 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3} = 0{,}184$ м.

26. Длина магнитопровода ротора $l_2 = l_1 = 0{,}14$ м.

27. Зубцовое деление ротора

$t_{Z2} = \pi D_2/Z_2 = \pi\, 0{,}184/38 = 0{,}0152$ м = 15,2 мм.

28. Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается на вал; по (9.102)

$D_j = D_B = k_B D_a = 0{,}23 \cdot 0{,}272 = 0{,}0626$ м $\approx$ 60 мм

(k_B, — по табл. 9.19).

29. Ток в обмотке ротора по (9.57)

$I_2 = k_i I_1 v_i = 0{,}904 \cdot 29{,}3 \cdot 15{,}73 = 417$ А,

где по (9.58) $k_i = 0{,}2 + 0{,}8 \cos\varphi = 0{,}2 + 0{,}8 \cdot 0{,}88 = 0{,}904$;

по (9.66)

$$v_i = \frac{2 m_1 w_1 k_{об1}}{Z_2 \cdot k_{ск}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 104 \cdot 0{,}958}{38} = 15{,}73$$

(пазы ротора выполняем без скоса — $k_{ск}$ = 1)

30. Площадь поперечного сечения стержня (предварительно) по (9.68)

$q_{п} = I_2/J_2 = 417/(2{,}5 \cdot 10^6) = 166{,}8 \cdot 10^{-6}$ м^2 = 166,8 мм^2

(плотность тока в стержне литой клетки принимаем $J_2 = 2{,}5 \cdot 10^6$ А/м^2).

31. Паз ротора определяем по рис. 9.40, б. Принимаем $b_{ш}$ = 1,5 мм; $h_{ш}$ = 0,7 мм; $h'_{ш}$ = 0,3 мм. Допустимая ширина зубца по (9.75)

$$b_{z2доп} = \frac{B_\delta t_{Z2} l_\delta}{B_{Z2} l_{ст2} k_{с}} = \frac{0{,}749 \cdot 15{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}14}{1{,}8 \cdot 0{,}14 \cdot 0{,}97} = 6{,}52 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 6{,}5 \text{ мм}$$

(принимаем B_{Z2} = 1,8 Тл по табл. 9.12).

Размеры паза (см. рис. 9.40):

по (9.76)

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 + 2h_{ш} - 2h'_{ш}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 + \pi} = \frac{\pi(184 + 2 \cdot 0{,}7 - 2 \cdot 0{,}3) - 38 \cdot 6{,}5}{38 + \pi} = 7{,}9 \text{ мм}$$

по (9.77)

$$\sqrt{\frac{b_1^2\left(\frac{Z_2}{\pi}+\frac{\pi}{2}\right)-4q_c}{\frac{Z_2}{\pi}+\frac{\pi}{2}}}=\sqrt{\frac{7{,}9^2(\frac{38}{\pi}+\frac{\pi}{2})-4\cdot 166{,}8\cdot 4}{\frac{38}{\pi}+\frac{\pi}{2}}} = 4{,}2 \text{ мм}$$

по (9.78)

$$h_1=(b_1-b_2)\frac{Z_2}{2\pi}=(7{,}9-4{,}2)\frac{38}{2\pi}=22{,}38\approx 22{,}4 \text{ мм.}$$

32. Уточняем ширину зубцов ротора по формулам табл. 9.20:

$$b_{Z2}=\pi\frac{D_2-2(h_Ш+h_Ш)b_1}{Z_2}-b_1=\pi\frac{184-2(0{,}7+0{,}3)-7{,}9}{38}-7{,}9 = 6{,}49\text{мм}\approx 6{,}5 \text{ мм;}$$

$$b_{Z2}=\pi\frac{D_2-2\,h_П+b_2}{Z_2}-b_2=\pi\frac{184-2\bullet 29{,}4+4{,}2}{38}-4{,}2=6{,}5 \text{ мм}$$

$$b_{Z2}=b_{Z2}\approx 6{,}5 \text{ мм}$$

Принимаем (см. рис. 9.73, б) b_1= 7,9; b_2 = 4,2 мм; h_1 = 22,4 мм.
Полная высота паза

$$h_{П2}=h_Ш+h_Ш+\frac{b_1}{2}+h_1+\frac{b_2}{2}=0{,}3+0{,}7+\frac{7{,}9}{2}+22{,}4+\frac{4{,}2}{2} = 29{,}5 \text{ мм}$$

33. Площадь поперечного сечения стержня по (9.79)

$$q_c=\frac{\pi}{8}(b_1^2+b_2^2)+\frac{1}{2}(b_1+b_2)\,h_1=\frac{\pi}{8}(7{,}9^2+4{,}2^2)+0{,}5(7{,}9+4{,}2)22{,}4=166{,}96\approx 167 \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в стержне

$J_2 = I_2/q_c$ = 417/167 • 10^{-6} = 2,5 • 10^6 А/м.

34. Короткозамыкающие кольца (см рис. 9.37, б). Площадь поперечного сечения кольца по (9.72)

$$q_{КЛ}=\frac{I_{КЛ}}{J_{КЛ}}=\frac{1267}{2{,}13\bullet 10^6}=595 \text{ мм}^2$$

По (9.70) и (9.71)

$$I_{КЛ}=\frac{I_2}{\Delta}=\frac{417}{0{,}329}=1267 \text{ А}$$

где

$$\Delta=2\sin\frac{\alpha_Z}{2}=2\sin\frac{\pi\rho}{Z_2}=2\sin\frac{\pi\bullet 2}{38}=0{,}329 \text{ А}$$

$J_{кл}$ = 0,85 J_2 = 0,85•2,5•10^6 = 2,13 • 10^6 А/м^2

Размеры короткозамыкающих колец:

$h_{кл}$ = 1,25 $h_{п2}$ = 1,25•29,5 = 37 мм;

$b_{кл}$ = $q_{кл}$ / $h_{кл}$ = 595/37 = 16 мм;

$q_{кл}$ = $h_{кл}$ / $b_{кл}$ = 37 • 16 = 592 мм^2;

$D_{к.ср} = D_2 - h_{кл} = 184 - 37 = 147$ мм.

Расчет магнитной цепи

Магнитопровод из стали 2013; толщина листов 0,5 мм.

35. Магнитное напряжение воздушного зазора по (9.103)

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta = 1{,}59 \bullet 10^6 \bullet 0{,}749 \bullet 1{,}22 \bullet 0{,}5 10^{-3} = 726{,}5 \text{ А},$$

по(4.15)

$$k_\delta = \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - \gamma_1 \delta} = \frac{12{,}1}{12{,}1 - 4{,}42 \bullet 0{,}5} = 1{,}22,$$

где

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ШЛ}/\delta)^2}{5 + b_{ШЛ}/\delta} = \frac{(3{,}7/0{,}5)^2}{5 + 3{,}7/0{,}5} = 4{,}42$$

36. Магнитное напряжение зубцовой зоны статора по (9.104)

$F_{Z1} = 1 h_{z1} H_{z1} = 2 \bullet 21{,}2 \bullet 10^{-3} \bullet 2070 = 87{,}8$ А,

где $h_{Z1} = H_{п1} = 21{,}2$ мм (см п. 20 расчета);

расчетная индукция в зубцах по (9.105)

$$B_{Z1} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{b_{Z1} l_{CT1} k_{C1}} = \frac{0{,}749 \bullet 12{,}1 \bullet 0{,}14}{4{,}9 \bullet 0{,}14 \bullet 0{,}97} = 1{,}91 \text{ Тл}$$

($b_{z1} = 4{,}9$ мм по п. 19 расчета; k_{c1}, = 0,97 по табл. 9.13). Так как $B'_{z1} > 1{,}8$ Тл, необходимо учесть ответвление потока в паз и найти действительную индукцию в зубце B_{Z1}. Коэффициент $k_{ПХ}$ по высоте $h_{zx} = 0{,}5\ h_z$ по (4.33)

$$k_{ПХ} = \frac{b_{ПХ} l_\delta}{b_{ZX} l_{CT1} k_{C1}} = \frac{0{,}749 \bullet 12 \bullet 1 \bullet 0{,}14}{4{,}9 \bullet 0{,}14 \bullet 0{,}97} = 1{,}85$$

где

$$b_{ПХ} = \frac{b_1 + b_2}{2} = \frac{7{,}6 + 10}{2} = 8{,}8$$

по (4.32)

$$B_{Z1} = B'_{z1} - \mu_0 H_{Z1} k_{ПХ}$$

Принимаем $B_{z1} = 1{,}9$ Тл, проверяем соотношение B_{Z1} и B'_{z1}:

$$1{,}9 = 1{,}91 - 1{,}256 \bullet 10^{-6} \bullet 2070 \bullet 1{,}85 = 1{,}9,$$

где для $B_{z1} = 1{,}9$ Тл по табл. П1.7 $H_{Z1} = 2070$ А/м.

37. Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора по (9.108)

$F_{Z2} = 2 h_{z2} H_{z2} = 2 \bullet 0{,}029 \bullet 1570 = 91{,}1$ А

при зубцах по рис. 9.40, б из табл. 9.20 $h_{z2} = h_{П2} - 0{,}1\ b_2 = 29{,}4 - 0{,}1 \bullet 4{,}2 = 29$ мм;

индукция в зубце по (9.109)

$$B_{Z2} = \frac{B_\delta t_{Z2} l_\delta}{b_{Z2} l_{CT2} k_{C2}} = \frac{0{,}749 \bullet 15{,}2 \bullet 10^{\ 3} \bullet 0{,}14}{6{,}5 \bullet 10^{\ 3} \bullet 0{,}14 \bullet 0{,}97} = 1{,}81 \text{ Тл}$$

по табл. П1.7 для $B_{Z2} = 1{,}81$ Тл находим $H_{Z2} = 1570$ А/м

38. Коэффициент насыщения зубцовой зоны по (9.115)

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{87{,}8 + 91{,}1}{726{,}5} = 1{,}25$$

39. Магнитное напряжение ярма статора по (9.116)

$F_a = L_a H_a = 0{,}196 \bullet 750 = 147$ А,

по (9.119)

$$L_a = \pi \frac{D_a - h_a}{2p} = \pi \frac{0{,}272 - 0{,}0223}{4} = 0{,}196 \text{ м};$$

где

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{П1} = \frac{0{,}272 - 0{,}185}{2} - 21{,}2 \bullet 10^{3} = 22{,}3 \bullet 10^{-3} \text{ м};$$

по (9.117)

$$B_a = \frac{\Phi}{2 h_a l_{CT1} k_{C1}} = \frac{9{,}7 \bullet 10^{3}}{2 \bullet 22{,}3 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}14 \bullet 0{,}97} = 1{,}6 \text{ Тл}$$

(при отсутствии радиальных вентиляционных каналов в статоре $h'_a = h_a = 22{,}3 \bullet 10^{-3}$ м), для $B_a = 1{,}6$ Тл по табл. П1.6 находим $H_a = 750$ А/м.

40. Магнитное напряжение ярма ротора по (9.121)

$F_j = L_j H_j = 72{,}7 \bullet 10^{-3} \bullet 155 = 11{,}3$ А.

По (9. 127)

$$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2P} = \frac{\pi(60 + 32{,}6) \bullet 10^{3}}{4} = 72{,}7 \bullet 10^{-3} \text{ м};$$

где

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{П2} = \frac{0{,}184 - 0{,}06}{2} - 29{,}4 \bullet 10^{3} = 32{,}6 \bullet 10^{-3} \text{ м};$$

по (9.122)

$$B_j = \frac{\Phi}{2 h_j l_{CT2} k_{C2}} = \frac{9{,}7 \bullet 10^{3}}{2 \bullet 39{,}1 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}14 \bullet 0{,}97} = 0{,}91 \text{ Тл}$$

где по (9.124) для четырехполюсных машин при $0{,}75\,(0{,}5\,D_2 - h_{п2}) < D_j$

$$h_j = \frac{2+p}{3{,}2p}\left(\frac{D_2}{2} - h_{П2}\right) - \frac{2}{3} d_{K2} m_{K2} = \frac{2+2}{3{,}2 \bullet 2}\left(0{,}5 \bullet 0{,}184 - 29{,}4 \bullet 10^{3}\right) = 39{,}1 \bullet 10^{3} \text{ м},$$

где для $m_{K2} = 0{,}91$ Тл по табл. П1.6 находим $H_j = 155$ А/м.

41. Магнитное напряжение на пару полюсов (по 9.128)

$F_ц = F_\delta + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 726{,}5 + 87{,}8 + 91{,}1 + 147 + 11{,}3 = 1063{,}7$ А.

42. Коэффициент насыщения магнитной цепи по (9.129)

$k_\mu = F_Ц / F_\delta = 1063{,}7/726{,}5 = 1{,}46$.

43. Намагничивающий ток по (9.130)

$$I_\mu = \frac{p F_Ц}{0{,}9 m_1 w_1 k_{ОБ1}} = \frac{2 \bullet 1063{,}7}{0{,}9 \bullet 3 \bullet 104 \bullet 0{,}958} = 7{,}91 \text{ А}.$$

Относительное значение по (9.131)

$I_{\mu*} = I_\mu / I_{1НОМ} = 7{,}91/29{,}3 = 0{,}27$.

$0{,}2 < I_{\mu*} < 0{,}3$.

Параметры рабочего режима

44. Активное сопротивление обмотки статора по (9.132)

$$r_1 = k_R \rho_{115} \frac{L_1}{q_{ЭФ1} a} = \frac{10^{6} \bullet 77{,}17}{41 \bullet 5{,}3 \bullet 10^{6}} = 0{,}355 \text{ Ом}$$

(дня класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура $\nu_{расч}$ = 115° С; для медных проводников $\rho_{115} = 10^{-6}/41$ Ом•м).
Длина проводников фазы обмотки по (9.134)

$L_1 = l_{cp1} w_1 = 0{,}742 \cdot 10^4 = 77{,}17$ м;

по (9.135) $l_{cp1} = 2(l_{П1} + l_{л1}) = 2(0{,}14 + 0{,}231) = 0{,}742$ м; $l_{П1} = l_1 = 0{,}14$ м; по (9.136)

$l_{л1} = К_л b_{кт} + 2В = 1{,}3 \cdot 0{,}162 + 2 \cdot 0{,}01 = 0{,}231$ м, где В = 0,01 м; по табл. 9.23 $К_л = 1{,}3$;
по (9.138)

$$b_{КТ} = \frac{\pi(D+h_{П})}{2p}\beta = \frac{\pi(0{,}185+0{,}0212)}{4} = 0{,}162 \text{ м}$$

Длина вылета лобовой части катушки по (9.140)
$l_{выл} = k_{выл} В_{КТ} + В = 0{,}4 \cdot 0{,}162 + 0{,}01 = 0{,}0748$ м = 74,8 мм, где по табл. 9.23 $К_{выл} = 0{,}4$.

Относительное значение r_1

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} = 0{,}355 \frac{29{,}3}{220} = 0{,}047.$$

45. Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора по (9.168)

$$r_2 = r_c + \frac{2r_к}{\Delta^2} = 40{,}89 \bullet 10^{\ 6} = 40{,}89 \bullet 10^{-6} + \frac{2 \bullet 10^{\ 6}}{0{,}329^2} = 59{,}37 \bullet 10^{-6} \text{ Ом};$$

по (9.169)

$$r_c = \rho_{115} \frac{l_2}{k_C} = \frac{10^{\ 6}}{20{,}5} \frac{0{,}14}{167 \bullet 10^{\ 6}} = 40{,}89 \bullet 10^{-6} \text{ Ом};$$

здесь $k_т = 1$;
по (9.170)

$$r_{КЛ} = \rho_{115} \frac{\pi D_{КЛ.СР}}{Z_2 q_{КЛ}} = \frac{10^{\ 6}\pi \bullet 0{,}147}{20{,}5 \bullet 38 \bullet 595 \bullet 10^{\ 6}} = 10^{-6} \text{ Ом},$$

где для литой алюминиевой обмотки ротора $\rho_{115} = \frac{10^{\ 6}}{20{,}5}$ Ом•м

Приводим r_2 к числу витков обмотки статора по (9.172), (9.173):

$$r_2 = r_2 \frac{4m_1(w_1 k_{ОБ1})^2}{Z_2 k_{СК}^2} = 59{,}37 \bullet 10^{-6} \frac{4 \bullet 3(104 \bullet 0{,}958)^2}{38} = 0{,}186 \text{ Ом},$$

здесь $k_{c1} = 1$.

Относительное значение

$$r_2 = r_2 \frac{I_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} = 0{,}186 \bullet \frac{29{,}3}{220} = 0{,}0248$$

46. Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по (9.152)

$$X_1 = 15{,}8 \frac{f_1}{100}\left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{pq}(\lambda_{П1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{Д1}) = 15{,}8 \frac{50}{100}\left(\frac{104}{100}\right)^2 \frac{0{,}14}{2 \bullet 4}(1{,}42 + 1{,}34 + 1{,}74) = 673 \text{ Ом},$$

где по табл. 9.26 (см. рис. 9.50, е) и по рис. 9.73

$$\lambda_{П1} = \frac{h_2}{3b_1}k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_К}{b_1 + 2b_Ш} + \frac{h_Ш}{b_Ш}\right)k_\beta = \frac{17{,}3}{3 \bullet 7{,}6} + \frac{3 \bullet 1{,}95}{7{,}6 + 2 \bullet 3{,}7} + \frac{1}{3{,}7} = 1{,}42$$

где (см. рис. 9.50, е и 9.73)
$h_2 = h_{п.к} - 2b_{ИЗ} = 18{,}1 - 2 \cdot 0{,}4 = 17{,}3$ мм; $b_1 = 7{,}6$ мм; $h_к = 0{,}5(b_1 - b_ш) = 0{,}5(7{,}6 - 3{,}7) = 1{,}95$ мм; $h_1 = 0$ (проводники закреплены пазовой крышкой); $k_\beta = 1$; $k'_\beta = 1$; $l'_\delta = l_\delta = 0{,}14$м по (9.154);

по (9.159)

$$\lambda_{л1} = 0{,}34\frac{q}{l_\delta}(l_{л1} - 0{,}64\beta\tau) = 0{,}34\frac{4}{0{,}14}(0{,}231 - 0{,}64 \bullet 0{,}145) = 1{,}34;$$

по (9.174)

$$\lambda_{д1} = \frac{t_{Z1}}{12\delta k_\delta}\xi = \frac{12{,}1}{12 \bullet 0{,}5 \bullet 1{,}22}1{,}05 = 1{,}74$$

по (9.176)

$$\xi = 2k_{CK}k_\beta - k_{ОБ1}^2\left(\frac{t_{Z2}}{t_{Z1}}\right)^2(1+\beta_{CK}^2) = 2 \bullet 1{,}25 - 0{,}958^2\left(\frac{15{,}2}{12{,}1}\right)^2 = 1{,}05$$

для $\beta_{ск} = 0$ и $t_{z2}/t_{z1} = 15{,}2/12{,}1 = 1{,}26$ по рис. 9.51, ∂ $k'_{CK} = 1{,}25$.

Относительное значение

$$x_{1*} = x_1\frac{I_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} = 0{,}673\frac{29{,}3}{220} = 0{,}09$$

47. Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора по (9.177)

$$x_2 = 7{,}9 f_1 l_\delta 10^{-6}(\lambda_П + \lambda_Л + \lambda_Д + \lambda_{СК}) = 7{,}9 \bullet 50 \bullet 0{,}14(2{,}58+0{,}59+2{,}09) = 291 \bullet 10^{-6} \text{ Ом},$$

где по табл. 9.27 (см. рис. 9.52, а, ж)

$$\left[\frac{h_0}{3b_1}\left(1-\frac{\pi b_1^2}{8q_C}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_ш}{2b_1}\right]k_Д + \frac{h_ш}{b_ш} + 1{,}12\frac{h_ш \bullet 10^6}{I_2} =$$

$$= \frac{24{,}08}{3 \bullet 7{,}9}\left(1 - \frac{\pi \bullet 7{,}9^2}{8 \bullet 167}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{1{,}5}{2 \bullet 7{,}9} + \frac{0{,}7}{1{,}5} + 1{,}12\frac{0{,}3 \bullet 10^{-3} \bullet 10^6}{417} = 2{,}58$$

где (см. рис. 9.52, *а*, *ж* и рис. 9.73)

$h_0 = h_1 + 0{,}4b_2 = 22{,}4 + 0{,}4 \bullet 4{,}2 = 24{,}08$ мм; $b_1 = 7{,}9$ мм; $b_ш = 1{,}5$ мм;

$h_ш = 0{,}7$ мм; $h'_ш = 0{,}3$ мм; $q_с = 167$ мм^2; по (9.178)

$$\lambda_{Л2} = \frac{2{,}3D_{КЛ.СР.}}{Z_2 l_\delta \Delta^2}\lg\frac{4{,}7D_{КЛ.СР}}{h_{КЛ} + 2b_{КЛ}} = \frac{2{,}3 \bullet 0{,}147}{38 \bullet 0{,}14 \bullet 0{,}329^2}\lg\frac{4{,}7 \bullet 0{,}147}{0{,}037 + 2 \bullet 0{,}016} = 0{,}587$$

по (9. 180)

$$\lambda_{Д2} = \frac{t_Z}{12\delta k_\delta}\xi = \frac{15{,}2 \bullet 1{,}005}{12 \bullet 0{,}5 \bullet 1{,}22} = 2{,}09$$

по (9.181)

$$\xi = 1 + \frac{1}{5}\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right)^2 - \frac{\Delta_Z}{1-(p/Z_2)^2} = 1{,}005$$

так как при закрытых пазах $\Delta_Z \approx 0$.

Приводим X_2 к числу витков статора по (9.172) и (9.183):

$$x'_2 = x_2\frac{4m(w_1 k_{ОБ1})^2}{Z_2 k_{СК}^2} = 291 \bullet 10^{-6}\frac{4 \bullet 3(104 \bullet 0{,}958)^2}{38} = 0{,}912 \text{ Ом}.$$

Относительное значение

$$x'_{2*} = x'_2\frac{I_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} = 0{,}912\frac{29{,}3}{220} = 0{,}121$$

Расчет потерь

48. Потери в стали основные по (9.187)

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/50}\ (\frac{f_1}{50})^2(k_{да}B_a^2m_a + k_{дz}B_{cp}^2m_{z1}) = 2{,}5(1{,}6 \bullet 1{,}6^2 \bullet 18{,}53 + 1{,}8 \bullet 1{,}92^2 \bullet 5{,}28) = 276{,}4\ Вт$$

[$p_{1,0/5,0}$ = 2,5 Вт/кг для стали 2013 по табл. 9.28];

по (9.188)

$m_a = \pi(D_a - h_a)\ h_a\ l_{ст1}\ k_{c1}\ \nu_c = \pi(0{,}272 - 0{,}0223) \bullet 0{,}0223 \bullet 0{,}14 \bullet 0{,}97 \bullet 7{,}8 \bullet 10^3 = 18{,}53$ кг;

по (9.189)

$m_{z1} = h_{z1}\ b_{z1cp}\ Z_1\ l_{ст1}\ k_{c1}\ \nu_{c1} = 21{,}2 \bullet 10^{-3} \bullet 4{,}9 \bullet 10^{-3} \bullet 48 \bullet 0{,}14 \bullet 0{,}97 \bullet 7{,}8 - 10^{-3} = 5{,}28$ кг;

$k_{ДА} = 1{,6}$; $k_{дz} = 1{,}8$ (см. § 9.11)].

49. Поверхностные потери в роторе по (9.194)

$P_{пов2} = p_{пов2}(t_{z2} - b_{ш2})Z_2\ l_{ст2} = 242{,}4(15{,}2 - 1{,}5)38{,}0{,}14 = 17{,}7$ Вт;

по (9.192)

$$P_{пов2} = 0{,}5\ k_{02}\ (\frac{Z_1 n}{10000})^{1,5}(B_{0,2}t_{z1} \bullet 10^3)^2 = 0{,}5 \bullet 1{,}5\left(\frac{48 \bullet 1500}{10000}\right)^{1,5}(0{,}338 \bullet 12{,}1)^2 = 242{,}4\ Вт/м^2.$$

где $k_{02} = 1{,}5$;

по (9.190)

$B_{01(2)} = \beta_{01(2)}\ k_\delta\ B_\delta = 0{,}37 \bullet 1{,}22 \bullet 0{,}749 = 0{,}338$ Тл;

где $b_ш/\delta = 3{,}7/0{,}5 = 7{,}4$ по рис. 9.53 $\beta_{02} = 0{,}37$.

50. Пульсационные потери в зубцах ротора по (9.200)

$$P_{пул2} \approx 0{,}11\ \left(\frac{Z_1 n}{1000}B_{пул2}\right)^2 m_{z2} = 0{,}11\left(\frac{45 \bullet 1500}{1000}0{,}132\right)^2 7{,}59 = 75{,}4\ Вт$$

по (9.196)

$$B_{пул2} = \frac{\gamma 1\delta}{2t_{z2}}B_{z2cp} = \frac{4{,}42 \bullet 0{,}5 \bullet 10^{\ 3}}{2 \bullet 15{,}2 \bullet 10^{\ 3}}1{,}81 = 0{,}132\ Тл$$

B_{z2cp} = 1,81 Тл из п. 37 расчета; γ_1 = 4,42 из п. 35 расчета;

по (9.201)

$m_{z2} = Z_2\ h_{z2}\ b_{z2cp}\ l_{ст2}\ k_{c2} = 38 \bullet 29 \bullet 10^{-3} \bullet 6{,}5 \bullet 10^{-3} \bullet 0{,}14 \bullet 0{,}97 \bullet 7800 = 7{,}59$ кг;

h_{z2} = 29 мм из п. 37 расчета; b_{z2} = 6,5 мм из п. 32 расчета.

51. Сумма добавочных потерь в стали по (9.202)

$P_{ст.доб} = P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2} = 17{,}7 + 75{,}4 = 93{,}1$ Вт

($P_{пов1}$ и $P_{пул1} \approx 0$, см. § 9.11).

52. Полные потери в стали по (9.203)

$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 276{,}4 + 93{,}1 = 369{,}5$ Вт

53. Механические потери по (9.210)

$P_{мех} = K_m(n/10)^2\ D_a^4 = 0{,}95\ (1500/10)^2\ 0{,}272^4 = 117$Вт

[для двигателей с 2р = 4 коэффициент $К_т = 1{,}3(1 - D_a) = 1{,}3(1 - 0{,}272) = 0{,}95$].

54. Холостой ход двигателя:

по (9.217)

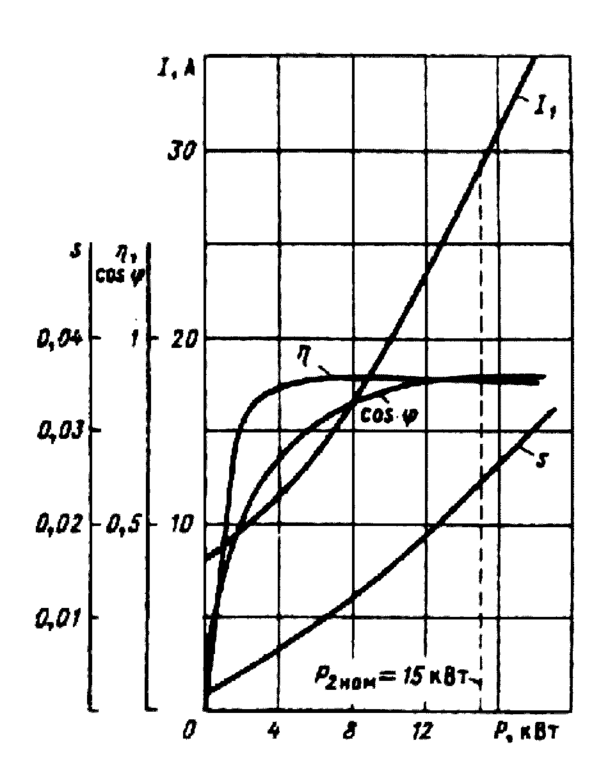


Рис.9.74. Рабочие характеристики спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором ($P_{2ном}$=15 кВт, 2р = 4, $U_{ном}$=220/380В, $I_н$=28,4 А, $\cos\varphi_{ном}$ = 0,894; $\eta_{ном}$ = 0,892, $S_{ном}$ = 0,024)

$$I_{x.x} = \sqrt{I_{x.x.a}^2 + I_{x.x.p}^2} = \sqrt{0{,}84^2 + 7{,}91^2} = 7{,}95 \text{ А}$$

[по (9.128)

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{тр} + P_{мех} + P_{э1х.х}}{mU_{1ном}} = \frac{369{,}5 + 117 + 66{,}6}{3 \bullet 220} =$$

=0,84 А

где по (9.219)

$P_{э1х.х} \approx 3\, I_\mu^2\, r_1 = 3 \bullet 7{,}91^2 \bullet 0{,}355 = 66{,}6$ Вт];

по (9.221)

$\cos\varphi_{х.х} = I_{х.х.а} / I_{х.х} = 0{,}84/7{,}95 = 0{,}11$

Расчет рабочих характеристик

55. Параметры

по (9.184)

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн}}{mI_\mu^2} = \frac{276{,}4}{3 \bullet 7{,}91^2} = 1{,}47 \text{ Ом;}$$

по (9.185)

$$x_{12} = \frac{U_{1ном}}{I_\mu} - x_1 = \frac{290}{7{,}91} - 0{,}673 = 27{,}14 \text{ Ом;}$$

по (9.223)

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0{,}673}{27{,}14} = 1{,}025$$

используем приближенную формулу, так как |y | < 1°:

$$\gamma = arctg\frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})} = \frac{0{,}335 \bullet 27{,}14 - 1{,}47 \bullet 0{,}673}{1{,}47 \bullet (0{,}355 + 1{,}47) + 27{,}14(0{,}673 + 27{,}14)} = \text{arctg } 0{,}01 \text{ рад} =$$

|34'| < 1°

Активная составляющая тока синхронного холостого хода: по (9.226)

$$I_{0a} = \frac{P_{CT.OCH} + 3 I_\mu^2 r_1}{3U_{1HOM}} = \frac{276{,}4 + 3 \bullet 7{,}91^2 \bullet 0{,}355}{3 \bullet 220} = 0{,}52 \text{ А}$$

по (9.227)

a’ = c_1^2 = $1{,}025^2$ = 1,051; b’ = 0;

a = $c_1\, r_1$ = 1,025 • 0,355 = 0,364 Ом;

b = $c_1(x_1 + c_1\, x'_2)$ = 1,025(0,673 + 1,025•0,912) = 1,648 Ом.

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения,

$P_{ст} + P_{мех}$ = 369,5 + 117 = 487 ≈ 0,49 кВт.

56. Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений s = 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03, принимая предварительно, что $s_{ном} \approx r_{2*}$ = 0,025. Результаты расчета сведены в табл. 9.36. После построения рабочих характеристик (рис. 9.74) уточняем значение номинального скольжения: $s_{ном}$ = 0,024.

Расчет рабочих характеристик см. § 9.12.

Номинальные данные спроектированного двигателя:

$P_{2ном}$ = 15 кВт, $U_{1ном}$ = 220/380 В, $I_{1ном}$ = 28,4 А, $\cos\varphi_{ном}$ = 0,894, $\eta_{ном}$ = 0,892.

Таблица 9.36. **Рабочие характеристики асинхронного двигателя (см. табл. 9.30)**

$P_{ном}$ = 15 кВт; 2p = 4; $U_{1ном}$ = 220/380 В; $I_{0а}$ =0,52 А;
$I_{0р} \approx I_{\mu}$ = 7,91 А; $P_{ст} + P_{тр.щ.} + P_{мех}$ = 0,49 кВт;
r_1 = 0,355 Ом; r'_2 = 0,186 Ом; c_1 = 1,025;
a' = 1,051; a = 0,364 Ом; b' = 0 Ом; b = 1,65 Ом

№ п/п	Расчетная формула	Размерность	Скольжение s						
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	$S_{ном}$ = =0,024
1	$a r_2 / s$	Ом	39,1	19,55	13,03	9,77	7,82	6,52	8,15
2	$R = a + a r_2 / s$	Ом	39,46	19,91	13,39	10,13	8,81	6,88	8,51
3	$X = b + b r_2 / s$	Ом	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	39,49	19,98	13,49	10,26	8,34	7,08	8,67
5	$I_2 = U_{1НОМ} / Z$	А	5,57	11,011	16,31	21,44	26,38	31,07	25,37
6	$\cos\varphi'_2 = R/Z$	-	6,999	0,996	0,993	0,987	0,981	0,972	0,982
7	$\sin\varphi_2 = X/Z$	-	0,042	0,083	0,122	0,161	0,198	0,233	0,19
8	$I_{1a} = I_{0a} + I_2 \cos\varphi_2$	А	6,08	11,49	16,72	21,68	26,4	30,72	25,43
9	$I_{1p} = I_{0p} + I_2 \sin\varphi_2$	А	8,14	8,82	9,9	11,36	13,13	15,15	12,73
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	10,16	14,48	19,43	24,28	29,48	34,25	28,44
11	$I_2 = c_1 I_2$	А	5,71	11,29	16,72	21,98	27,04	31,85	26
12	$P_1 = 3 U_{1ном} I_{1a} 10^{-3}$	кВт	4,01	7,58	11,03	14,31	17,42	20,28	16,78
13	$P_{э1} = 3 I_1^2 r_1 10^{-3}$	кВт	0,11	0,223	0,402	0,638	0,926	1,25	0,861
14	$P_{э2} = 3 (I_1^1)^2 r'_2 10^{-3}$	кВт	0,018	0,071	0,156	0,27	0,408	0,566	0,377
15	$P_{доб} = 0{,}005 P_1$	кВт	0,034	0,048	0,064	0,081	0,097	0,113	0,084
16	$\Sigma P = P_{ст} + P_{мех} + P_{тр.щ} + P_{э1} + P_{э2} + P_{э.щ} + P_{доб}$	кВт	0,652	0,832	1,112	1,479	1,921	2,418	1,812
17	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	3,36	6,75	9,92	12,83	15,5	17,86	14,97
18	$\eta = 1 - \sum P / P_1$	-	0,838	0,891	0,899	0,897	0,89	0,881	0,892
19	$\cos\varphi = I_{1a}/I_1$	-	0,598	0,794	0,861	0,886	0,896	0,897	0,894

Расчет пусковых характеристик

а) Расчет токов с учетом влияния изменения параметров под влиянием эффекта вытеснения тока (без учета влияния насыщения от полей рассеяния)

Расчет проводится по формулам табл. 9.32 в целях определения токов в пусковых режимах для дальнейшего учета влияния насыщения на пусковые характеристики двигателя. При отсутствии необходимости учитывать влияние насыщения от полей рассеяния расчет пусковых

характеристик проводится аналогично, включая последние пункты формуляра (см. табл. 9.32). Подробный расчет приведен для $s = 1$. Данные расчета остальных точек сведены в табл. 9.37.

Таблица 9.37. Расчет токов в пусковом режиме асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока (см. табл. 9. 32)

$P_{2ном}$ = 15 кВт; $U_{1ном}$ = 220/380 В; 2р = 4; $I_{1ном}$ = 28,4 А; $I_{2ном}$ = 26 А; x_1 = 0,673 Ом; x'_2 = 0,912 Ом; $x_{12п}$ = 39,62 Ом; $c_{1п}$ = 1,017; r_1 = 0,355 Ом; r'_2 = 0,186 Ом; $s_{ном}$ = 0,024

№ п/п	Расчетная формула	Раз-мер-ность	Скольжение s					
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	$S_{кр}$ = =0,14
1	$\xi = 6361\, h_c \sqrt{s}$ (9.245)	-	1,81	1,63	1,28	0,81	0,57	-
2	$\varphi = \varphi(\xi)$	-	0,66	0,45	0,19	0,04	0,01	-
3	$h_r = h_c/(1+\varphi)$	мм	17,2	19,7	23,9	28,5	28,5	28,5
4	$k_r = q_c/q_r$	-	1,46	1,3	1,12	1	1	1
5	$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2}(k_r - 1)$	-	1,32	1,21	1,08	1	1	1
6	$r_{2\xi} = K_R r_2$	Ом	0,246	0,225	0,2	0,186	0,186	0,186
7	$k_д = \varphi'(\xi)$	-	0,81	0,86	0,93	0,97	0,99	0,98
8	$\lambda_{П2\xi} = \lambda_{П2} - \Delta\lambda_{П2\xi}$	-	2,33	2,4	2,49	2,54	2,57	2,55
9	$K_X = \sum\lambda_{2\xi}/\sum\lambda_2$	-	0,95	0,97	0,98	0,99	1	1
10	$x_{2\xi} = K_X x_2$	Ом	0,866	0,885	0,894	0,903	0,912	0,908
11	$R_П = r_1 + c_{1П}\frac{r'_{2\xi}}{s}$	Ом	0,605	0,641	0,762	1,3	2,25	1,7
12	$X_П = x_1 + c_{1П} x_{2\xi}$	Ом	1,55	1,57	1,58	1,59	1,6	1,6
13	$I_{2П} = U_{НОМ}/\sqrt{R_П^2 + X_П^2}$	А	132,2	129,7	125,4	107,1	79,7	94,2
14	$I_{1П} = I_2\sqrt{R_П^2 + (X_П + x_{12П})^2}/(c_{1П}x_{12П})$	А	135,1	132,6	128,2	109,6	81,7	96,8

57. Активное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока [$\nu_{расч}$ = 115° С, $\rho_{115} = 10^{-6}/20,5$ Ом • м; $b_c/b_п = 1$; f_1 = 50 Гц];

по рис. 9.73 $h_c = h_п - (h_ш + h'_ш) = 29,5 - (0,7 + 0,3) = 28,5$ мм;

$$\xi = 2\pi h_c \sqrt{\frac{b_c}{b_П}\frac{f_2}{\rho_V}10^{-7}} = 63,61\, h_c\sqrt{s} = 63,61 \bullet 0,0285 = 1,81;$$

по рис. 9.57 для ξ = 1,81; = 1,81 находим φ = 0,66;

по (9.246)

$h_r = h_c / (1+\varphi) = 0,0285/(1+0,66) = 0,1772$ м = 17,2 мм;

по (9.253), так как (0,5 • 7,9) < 17,2 < (22,4 + 0,5 • 7,9) (см. рис. 9.73)

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2}\left(h_r - \frac{b_1}{2}\right) = \frac{\pi \bullet 7,9^2}{8} + \frac{7,9 + 5,71}{2}(17,2 - 0,5 \bullet 7,9) = 114,7 \text{ мм}^2,$$

где

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1}\left(h_r - \frac{b_1}{2}\right) = 7{,}9 - \frac{7{,}9 - 4{,}2}{22{,}4}(17{,}2 - ,5 \bullet 7{,}9) = 5{,}71 \text{ мм};$$

по (9.247)

$k_r = q_c / q_r = 167/114{,}7 = 1{,}46$

(q_c - по п. 33 расчета);

по (9.257)

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2}(k_r - 1) = 1 + \frac{40{,}89 \bullet 10^{\ 6}(1{,}46 - 1)}{59{,}37 \bullet 10^{\ 6}} = 1{,}32$$

(по п. 45 расчета $r'_c = r_c = 40{,}89 \cdot 10^{-6}$ Ом; $r_2 = 59{,}37 \cdot 10^{-6}$ Ом). Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

$r'_{2\xi} = K_r r'_2 = 1{,}32 \bullet 0{,}186 = 0{,}246$ Ом.

58. Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока по рис. 9.58 для $\xi = 1{,}81$ (см. п. 57 расчета) $\varphi' = k_д = 0{,}81$; по табл. 9.27, рис. 9.52, *а, ж* (см. также п. 47 расчета) и по (9.262)

$$K_X = \frac{\lambda_{П2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{Д2}}{\lambda_{П2} + \lambda_{л2} + \lambda_{Д2}} = \frac{2{,}33 + 0{,}59 + 2{,}09}{2{,}58 + 0{,}59 + 2{,}09} = 0{,}95$$

где

по п. 47 расчета $\lambda_{п2\xi} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2\xi} = 2{,}58 - 0{,}25 = 2{,}33$,

$\Delta\lambda_{п2\xi} = \lambda'_{п2}(1 - k_д) =$

$$= \left[\frac{h_0}{3b_1}\left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_C}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_ш}{2b_1}\right](1 - k_Д) = \left[\frac{24{,}08}{3 \bullet 7{,}9}\left(1 - \frac{7{,}9^2}{8 \bullet 167}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{1{,}5}{2 \bullet 7{,}9}\right](1 - 0{,}81) = = 0{,}25$$

по (9.261) — см. также п. 47 расчета

$x'_{2\xi} = x'_2 K_x = 0{,}912 \bullet 0{,}95 = 0{,}866$ Ом.

59. Пусковые параметры по (9.277) и (9.278)

$x_{12п} = k_\mu x_{12} = 1{,}46 \bullet 27{,}14 = 39{,}62$ Ом;

$$c_{12п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12П}} = 1 + \frac{0{,}673}{39{,}62} = 1{,}017$$

60. Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

по (9.280) для $s = 1$

$R_п = r_1 + c_{1п} r'_{2\xi}/s = 0{,}355 + 1{,}017 \bullet 0{,}246 = 0{,}605$ Ом;

$X_п = x_1 + c_{1п} x'_{2\xi} = 0{,}673 + 1{,}017 \bullet 0{,}866 = 1{,}55$ Ом;

по (9.281)

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_П^2 + X_П^2}} = \frac{220}{\sqrt{0{,}605^2 + 1{,}55^2}} = 132{,}2 \text{ А};$$

по (9.283)

$$I_{1П} = I_{2П}\frac{\sqrt{R_П^2 + (X_П + x_{12П})^2}}{c_{1П}x_{12П}} = 132{,}2\frac{\sqrt{0{,}605^2 + (1{,}55 + 39{,}62)^2}}{1{,}017 \bullet 39{,}62} = 135{,}1 \text{ А}.$$

Расчет пусковых характеристик с учетом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

Расчет проводим для точек характеристик, соответствующих s = 1; 0,8; 0,5; 0,1, при этом используем значения токов и сопротивлений для тех же скольжений с учетом влияния вытеснения тока (см. табл. 9.37).

Данные расчета сведены в табл. 9.38. Подробный расчет приведен для s = 1.

Таблица 9.38. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния (см. табл. 9.33)

$P_{2ном}$ = 15 кВт; U_1 = 220/380 В; 2р = 4; $I_{1ном}$ = 28,4 А; $I'_{2ном}$ = 26 А;
x_1 = 0,67 Ом; x'_2 = 0,912 Ом; $x_{12п}$ = 39,62 Ом; r_1 = 0,355 Ом;
r'_2 =0,186 Ом; $s_{ном}$ = 0,024; C_N = 0,978

№ п/п	Расчетная формула	Размерность	Скольжение s					
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	$s_{кр}$= – 0,14
1	$k_{нас}$	—	1,35	1,3	1,2	1,1	1,05	1,08
2	$F_{п.ср} = 0{,}7\dfrac{I_1 k_{нас} u_п}{a}(k'_\beta + k_{y1}k_{ОБ1}\dfrac{Z_1}{Z_2})$	А	3668	3467	3094	2422	1725	2102
3	$B_{Фδ} = F_{п.ср}\, 10^{-6} / (1{,}6\, \delta\, C_N)$	Тл	4,69	4,43	3,95	3,1	2,21	2,69
4	$k_\delta = f(B_{Фδ})$	—	0,5	0,53	0,61	0,72	0,84	0,79
5	$c_1 = (t_{z1} - b_ш)(1 - k_\delta)$	мм	4,2	3,95	3,28	2,35	1,34	1,76
6	$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас}$	—	1,17	1,18	1,2	1,25	1,31	1,28
7	$\lambda_{Д1} = k_\delta\, \lambda_{Д1}$	—	0,87	0,92	1,06	1,25	1,46	1,37
8	$x_{1нас} = x_1 \sum\lambda_{1нас} / \sum\lambda_1$	Ом	0,505	0,514	0,538	0,574	0,615	0,597
9	$c_{1п} = 1 + x_{1нас} / x_{12п}$	—	1,013	1,013	1,014	1,014	1,016	1,015
10	$c_2 = (t_{z2} - b_{ш2})(1 - k_\delta)$	мм	6,85	6,44	5,34	3,84	2,19	2,88
11	$\lambda_{п2\xi нас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас}$	—	1,78	1,86	1,96	2,06	2,17	2,11
12	$\lambda_{Д2} = k_\delta\, \lambda_{Д2}$	—	1,05	1,11	1,27	1,5	1,76	1,65
13	$x'_{2\xi нас} = x'_2 \sum\lambda_{2\xi нас} / \sum\lambda_2$	Ом	0,593	0,617	0,662	0,72	0,787	0,754
14	$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас}\, r'_{2\xi} / s$	Ом	0,6	0,64	0,76	1,3	2,24	1,7
15	$X_{п.нас} = x_{1нас} + c_{1п.нас}\, x'_{2\xi нас}$	Ом	1,11	1,14	1,21	1,3	1,41	1,36
16	$I'_{2нас} = U_1 / \sqrt{R^2_{П.НАС} + X^2_{П.НАС}}$	А	174,4	168,3	153,9	119,7	83,1	101,1
17	$I_{1нас} = I'_{2нас}\dfrac{\sqrt{R^2_{П.НАС} + (X_{П.НАС} + x_{12П})^2}}{c_{1П.НАС}\, x_{12П}}$	А	177	170,9	156,4	122	84,6	103,1
18	$k'_{нас} = I_{1нас} / I_{1п}$ (сравнить с принятым в п.1 $k_{нас}$)	—	1,31	1,29	1,22	1,11	1,04	1,07
19	$I_{1*} = I_{1нас} / I_{1ном}$	—	6,2	6	5,5	4,3	3	3,6
20	$M_* = \left(\dfrac{I'_{2НАС}}{I'_{2НОМ}}\right)^2 K_R \dfrac{S_{НОМ}}{S}$	—	1,43	1,52	1,82	2,54	2,45	2,59

61. Индуктивные сопротивления обмоток. Принимаем $k_{нас} = 1{,}35$:
по (9.263)

$$F_{П.СР} = 0{,}7\frac{k_{нас} I_1 u_{п1}}{a}\left(k_\beta + k_{у1} k_{об1}\frac{Z_1}{Z_2}\right) = 0{,}7\frac{135{,}1 \bullet 1{,}35 \bullet 13}{1}\left(1 + 0{,}958\frac{48}{38}\right) = 3668 \text{ А}$$

по (9.265)

$$C_N = 0{,}64 + 2{,}5\sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 0{,}64 + 2{,}5\sqrt{\frac{0{,}5}{12{,}1 + 15{,}2}} = 0{,}968;$$

по (9.264)

$$B_{ф\delta} = \frac{F_{п.ср}}{1{,}6\delta C_N}10^{6} = \frac{3668 \bullet 10^{6}}{1{,}6 \bullet 0{,}5 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}978} = 4{,}69 \text{ Тл}$$

По рис. 9.61 для $B_{Ф\delta} = 4{,}69$ Тл находим $k_\delta = 0{,}5$.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:

по (9.266)

$c_{Э1} = (t_{Z1} - b_{ш1})(1 - k_\delta) = (12{,}1 - 3{,}7)(1 - 0{,}5) = 4{,}2;$

по (9.269)

$$\Delta\lambda_{П.1НАС} = \frac{h_Ш + 0{,}58 h_к}{b_{Ш1}}\frac{c_{Э1}}{c_{Э1} + 1{,}5 b_{Ш1}} = \frac{1 + 0{,}58 \bullet 1{,}95}{4{,}7}\frac{4{,}2}{4{,}2 + 1{,}5 \bullet 3{,}7} = 0{,}25$$

[$h_к = \dfrac{b_1 - b_Ш}{2} = \dfrac{7{,}6 - 3{,}7}{2} = 1{,}95$мм (см. рис. 9.73)];

по (9.272)

$\lambda_{п1нас} = \lambda_п - \Delta\lambda_{п1нас} = 1{,}42 - 0{,}25 = 1{,}18.$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения по (9.274)

$\lambda_{Д1нас} = \lambda_{Д1}\, к_\delta = 1{,}74 \bullet 0{,}5 = 0{,}87.$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения по (9.275)

$$x_{1НАС} = x_1\frac{\sum\lambda_{1НАС}}{\sum\lambda_1} = 0{,}673\frac{1{,}18 + 1{,}34 + 0{,}87}{1{,}42 + 1{,}34 + 1{,}74} = 0{,}505 \text{ Ом}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учетом влияния насыщения и вытеснения тока:

по (9.271) (см. п. 47 и 58 расчета)

$$\Delta\lambda_{П.2НАС} = \frac{h_Ш}{b_Ш}\frac{c_{Э2}}{b_Ш + c_{Э2}} = \frac{1}{1{,}5}\frac{6{,}85}{6{,}85 + 1{,}5} = 0{,}55$$

где по (9.270)

$c_{Э2} = (t_2 - b_ш)(1 - k_\delta) = (15{,}2 - 1{,}5)(1 - 0{,}5) = 6{,}85$

(для закрытых пазов ротора $h_{ш2} = h'_ш + h_ш = 0{,}3 + 0{,}7 = 1$ мм);

по (9.273)

$\lambda_{п2нас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас} = 2{,}33 - 0{,}55 = 1{,}78.$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения по (9.274)

$\lambda_{Д2нас} = \lambda_{Д2}\, к_\delta = 2{,}09 \bullet 0{,}5 = 1{,}05.$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения по (9.276)

$$x_{2\xi НАС} = x_2 \frac{\sum \lambda_{2\xi НАС}}{\sum \lambda_2} = 0{,}912 \frac{1{,}78 + 1{,}05 + 0{,}59}{2{,}58 + 2{,}09 + 0{,}59} = 0{,}593 \text{ Ом};$$

по (9.278)

$$c_{1Пнас} = 1 + \frac{x_{1НАС}}{x_{12П}} = 1 + \frac{0{,}505}{39{,}62} = 1{,}013$$

здесь $x_{12п}$ по (9.277).

62. Расчет токов и моментов:

по (9.280)

$$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} \frac{r_{2\xi}}{s} = 0{,}355 + 1{,}013 \cdot 0{,}246 = 0{,}604 \text{ Ом};$$

$$X_{п.нас} = X_{1нас} + c_{1п.нас}\, x'_{2\xi нас} = 0{,}505 + 1{,}013.0{,}593 = 1{,}11 \text{ Ом};$$

по (9.281)

$$I_{2НАС} = \frac{U_{1НОМ}}{\sqrt{R^2_{П.НАС} + X^2_{П.НАС}}} = \frac{220}{\sqrt{0{,}604^2 + 1{,}11^2}} = 174{,}1 \text{ А}$$

по (9.283)

$$I_{1НАС} = I_{2НАС} \frac{\sqrt{R^2_{П.НАС} + (X_{П.НАС} + x_{12П})^2}}{c_{1П.НАС} x_{12П}} = 174{,}1 \frac{\sqrt{0{,}604^2 + (1{,}11 + 39{,}62)^2}}{1{,}013 \bullet 39{,}62} = 176{,}7 \text{ А};$$

Кратность пускового тока с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения

$$I_{п*} = \frac{I_{1П.НАС}}{I_{1НОМ}} = \frac{176{,}7}{28{,}4} = 6{,}2$$

Кратность пускового момента с учетом влияния вытеснения тока и насыщения по (9.284)

$$M_{п*} = \left(\frac{I_{2П.НАС}}{I_{2НОМ}}\right)^2 K_R \frac{s_{НОМ}}{s} = \left(\frac{174.1}{26}\right)^2 1{,}32 \bullet 0{,}24 = 1{,}43$$

Полученный в расчете коэффициент насыщения

$$k_{НАС} = \frac{I_{1П.НАС}}{I_{1П}} = \frac{177}{135{,}1} = 1{,}31$$

отличается от принятого $k_{нас}$ =1,35 менее чем на 3 %.

Для расчета других точек характеристики задаемся $k_{нас}$, уменьшенным в зависимости от тока I_1 (см. табл. 9.37);

принимаем при

$s = 0{,}8$ kнас = 1,3;
$s = 0{,}5$ kнас = 1,2;
$s = 0{,}2$ kнас = 1,1;
$s = 0{,}1$ kнас = 1,05.

Данные расчета сведены в табл. 9.38, а пусковые характеристики представлены на рис. 9.75.

63. Критическое скольжение определяем после расчета всех точек пусковых характеристик (табл. 9.38) по средним значениям сопротивлений $x_{1нас}$ и $x'_{2\xi нас}$, соответствующим скольжениям s = 0,2... 0,1:
по (9.286)

$$s_{КР} = \frac{r'_{2\xi}}{x_{1НАС}/c_{1П.НАС} + x'_{2\xi НАС}} = \frac{0{,}186}{0{,}59/1{,}015 + 0{,}713} = 0{,}14,$$

после чего рассчитываем кратность максимального момента: M_{*max} = 2,59 (см. табл. 9.38).

Спроектированный асинхронный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ как по энергетическим показателям (КПД и cosφ), так и по пусковым характеристикам.

Тепловой расчет

64. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя по (9.315)

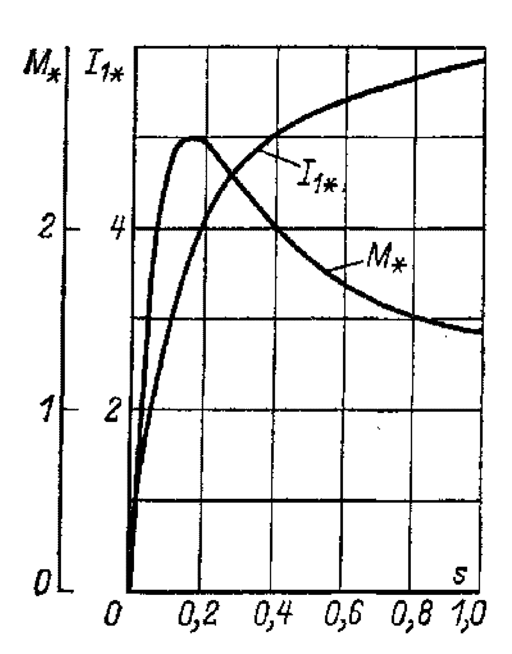
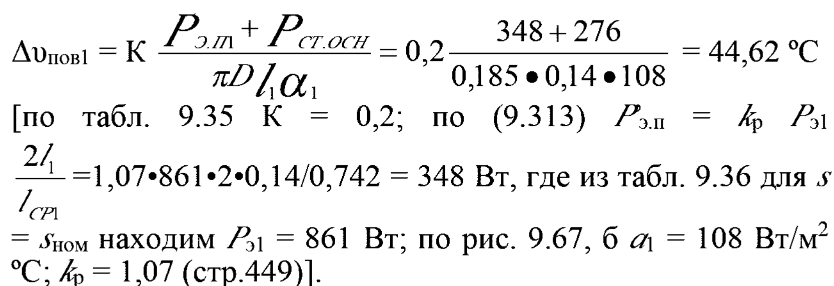


Рис. 9.75. Пусковые характеристики спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором (P_2 = 15 кВт, 2p=4, $U_{ном}$ = 220/380 В, $M_{п*}$ = 1,43, $I_{п*}$ = 6,2, M_{max} = 2,59)



$$\Delta\upsilon_{пов1} = К\frac{P'_{Э.П1} + P_{СТ.ОСН}}{\pi D l_1 \alpha_1} = 0{,}2\frac{348 + 276}{0{,}185 \bullet 0{,}14 \bullet 108} = 44{,}62\ ^\circ C$$

[по табл. 9.35 К = 0,2; по (9.313) $P'_{э.п}$ = $k_р$ $P_{э1}$ $\frac{2l_1}{l_{СР1}}$ =1,07•861•2•0,14/0,742 = 348 Вт, где из табл. 9.36 для s = $s_{ном}$ находим $P_{э1}$ = 861 Вт; по рис. 9.67, б α_1 = 108 Вт/м^2 °С; $k_р$ = 1,07 (стр.449)].

65. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора по (9.316)

$$\Delta\vartheta_{ИЗ.П1} = \frac{P'_{Э.П1}}{Z_1 П_{П1} l_1}\left(\frac{b_{ИЗ1}}{\lambda_{ЭКВ}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{ЭКВ}}\right) = \frac{348}{48 \bullet 0{,}054 \bullet 0{,}14}\left(\frac{0{,}4}{0{,}16} + \frac{7{,}6 + 10}{1{,}6 \bullet 1{,}4}\right) \bullet 10^{-3} = 3{,}15\ ^\circ C$$

[по (9.317) $П_{п1}$ = $2h_{пк}$ + b_1 + b_2 = 2 • 18,3 + 10 + 7,6 = 54,2 мм = 0,054 м; для изоляции класса нагревостойкости F$\lambda_{экв}$ = 0,16 Вт/м^2, по рис. 9.69 для d/$d_{из}$ = 1,5/1,585 = 0,95 находим $\lambda'_{экв}$ = 1,4 Вт/(м^2 • °С)].

66. Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей по (9.319)

$$\Delta\vartheta_{ИЗ.Л1} = \frac{P'_{Э.Л1}}{2Z_1 П_{Л1} l_{Л1}}\left(\frac{b_{ИЗ.Л1}}{\lambda_{ЭКВ}} + \frac{h_{П1}}{12\lambda'_{ЭКВ}}\right) = \frac{574}{2 \bullet 48 \bullet 0{,}054 \bullet 0{,}23}\left(\frac{0{,}05}{0{,}16} + \frac{18{,}3}{12 \bullet 1{,}4}\right) \bullet 10^{-3} = 0{,}67\ ^\circ C$$

[по (9.314)

$$P'_{э.л1} = k_р P_{э1}\frac{2l_{Л1}}{l_{СР1}} = 1{,}07 \bullet 861\frac{2 \bullet 0{,}231}{0{,}742} = 574 \text{ Вт};$$

$П_{л1}$ = $П_{п1}$ = 0,742 м; $b_{из.л1\ max}$ = 0,05 мм].

67. Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя по (9.320)

$$\Delta\vartheta_{ПОВ.Л1} = \frac{K P'_{Э.Л1}}{2\pi D l_{ВЫЛ1}\alpha_1} = \frac{0{,}2 \bullet 574}{2\pi \bullet 0{,}185 \bullet 74{,}8 \bullet 10^{-3} \bullet 108} = 12{,}23\ ^\circ C$$

68. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя по (9.321)

$$\Delta\vartheta'_1 = [(\Delta\vartheta_{ПОВ1} + \Delta\vartheta_{ИЗ.П1})2l_1 + (\Delta\vartheta_{ИЗ.Л1} + \Delta\vartheta_{ПОВ.Л1})2l_{Л1}]/l_{СР.1} = [(44{,}62 + 3{,}15) \bullet 2 \bullet 0{,}14 +$$
$$+ (0{,}67 + 12{,}23) \bullet 2 \bullet 0{,}23] / 0{,}742 = 26{,}02\ ^\circ C$$

69. Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды по (9.322)

$$\Delta\vartheta_B = \sum P_B/(S_{КОР}\alpha_B) = 1293 / (0{,}99 \bullet 20) = 65{,}3\ ^\circ C$$

[по (9.326)

$$\sum P_в = \sum P - (1 - К)(P_{э.п1} + P_{ст.осн}) - 0{,}9P_{мех} = 1897 - (1 - 0{,}2)(348+276) - 0{,}9 \bullet 1\ 17 = 1293 Вт,$$

где по (9.324)

$$\sum P = \sum P + (k_p - 1)(P_{Э1} + P_{Э2}) = 1812 + (1{,}07 - 1)(861 + 377) = 1897\ Вт;$$

$\sum P$ = 1812 Вт из табл. 9.36 для $s = s_{ном}$; по (9.327) $s_{кор} = (\pi D_a + 8П_р)(l_1 + 2l_{выл1})$ = (π 0,272 + + 8 • 0,32)(0,14 + 2 • 0,0748) = 0,99 м^2, где по рис. 9.70 $П_р$ = 0,32 м для h = 160 мм; по рис. 9.67, б $a_в$ = 20 Вт/(м^2 •°С) для D_a = 0,272 м].

70. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды по (9.328)

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta_1 + \Delta\vartheta_B = 26{,}02 + 65{,}3 = 91{,}32^\circ\ C.$$

71. Проверка условий охлаждения двигателя.

Требуемый для охлаждения расход воздуха по (9.340)

$$Q_B = \frac{k_m \sum P_B}{1100\Delta v_B} = \frac{5{,}05 \bullet 1897}{1100 \bullet 65{,}3} = 0{,}13\ м^3/с$$

[по (9.341)

$$k_m = m' \sqrt{\frac{n}{100} D_a} = 2{,}5 \sqrt{\frac{1500}{100} 0{,}272} = 5{,}05$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, по (9.342)

$$Q'_в = 0{,}6\ D^3_a \frac{n}{100} = 0{,}6 \bullet 0{,}272^3 \frac{1500}{100} = 0{,}18\ м^3/с.$$

Нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах.

Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

Вывод: спроектированный двигатель отвечает поставленным в техническом задании требованиям.

9.16.2. Расчет асинхронного двигателя с фазным ротором

Техническое задание

Спроектировать трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором: P_2 = = 132 кВт; U = 380/660 В; 2р = 6; конструктивное исполнение IM1001; исполнение по способу защиты IP23; способ охлаждения IC01; климатическое исполнение и категория размещения УЗ; класс нагревостойкости изоляции F.

Выбор главных размеров

1. По рис. 9.18, б принимаем h = 315 мм; по табл. 9.8 находим для данной оси вращения D_a = 590 мм = 0,59 м.

2. По (9.2)

$D = K_D D_a = 0{,}72 \bullet 0{,}59 = 0{,}425$ м

(по табл. 9.9 для 2р = 6 находим K_D = 0,72).

3. По (9.4)

$$P' = mIE = P_2 \frac{P_2}{\eta cos\varphi} = 132 \frac{0{,}98}{0{,}92 \bullet 0{,}88} = 159{,}8\ кВ \bullet А$$

(k_E = 0,98 — по рис. 9.20; η = 0,92; cosφ = 0,88 — по рис. 9.21, в).

4. По (9.6)

$$l_\delta = \frac{p}{D^2 \Omega k_B k_{об1} A B_\delta} = \frac{159{,}8 \bullet 10^3}{0{,}425^2 \bullet 104{,}7 \bullet 1{,}11 \bullet 0{,}92 \bullet 51 \bullet 10^3 \bullet 0{,}84} = 0{,}193 \approx 0{,}19 \text{ м};$$

5. По (9.5)

$$\Omega = 2\pi \frac{f}{p} = 2\,\pi\,50/3 = 104{,}7 \text{ рад/с};$$

по рис. 9.23,б $A = 51 \bullet 103$ А/м; $B_\delta = 0{,}84$ Тл; принимаем предварительно $k_{об1} = 0{,}92$.

6.

$\lambda = l_\delta / \tau = 0{,}19/0{,}2225 = 0{,}85.$

Окончательно принимаем

$D_a = 0{,}59$ м; $D = 0{,}425$ м; $l_1 = l_\delta = 0{,}19$ м.

Расчет зубцовой зоны и обмотки статора

7. По (9.16)

$$Z_{1\min} \div Z_{1\max} = \frac{\pi D}{t_{Z1\max}} \div \frac{\pi D}{t_{Z1\min}} = \frac{\pi 425}{22} \div \frac{\pi 425}{17} = 60{,}7 \div 78{,}5$$

(по табл. 9.11 зубцовое деление при прямоугольных полуоткрытых пазах статора $t_{Z1} = 17...22$ мм).

8. Принимаем

$Z_1 = 72$; $q_1 = Z_1/(2pm) = 72/(6 \bullet 3) = 4$;

$$t_{Z1} = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi 0{,}425}{72} = 18{,}54 \bullet 10^{-3} \text{ м} = 18{,}54 \text{ мм}.$$

9. По (9.17)

$$u_П = \frac{\pi D A}{I_{1НОМ} Z_1} = \frac{\pi 0{,}425 \bullet 51 \bullet 10^3}{143 \bullet 72} = 6{,}61$$

по (9.18)

$$I_{1НОМ} = \frac{P_2}{m U_{1НОМ} \cos\varphi\eta} = \frac{132000}{3 \bullet 380 \bullet 0{,}92 \bullet 0{,}88} = 143 \text{ А};$$

по (9.19)

$u_п = a\,u'_п = 3 \bullet 6{,}61 = 19{,}83.$

Принимаем $a = 3$; $u_п = 20$.

10. По (9.20)

$$w_1 = \frac{u_П Z_1}{2am} = \frac{20 \bullet 72}{2 \bullet 3 \bullet 3} = 80$$

11.По (9.21)

$$A = \frac{2 I_{1НОМ} w_1 m}{\pi D} = \frac{2 \bullet 143 \bullet 80 \bullet 3}{\pi \bullet 0{,}425} = 54{,}41 \bullet 10^3 \text{ А/м}$$

12.$k_{об} = k_{р1}\,k_{у1} = 0{,}958 \bullet 0{,}966 = 0{,}925$

по табл. 3.16 для $q = 4$ $k_{р1} = 0{,}958$; по (3.11)

$$k_{у1} = \sin\left(\frac{\pi}{2}\beta\right) = \sin\left(\frac{\pi}{2}0{,}833\right) = 0{,}966,$$

где $\beta = y/\tau = 10/12 = 0{,}833$; $\tau = Z_1/2p = 72/6 = 12$.

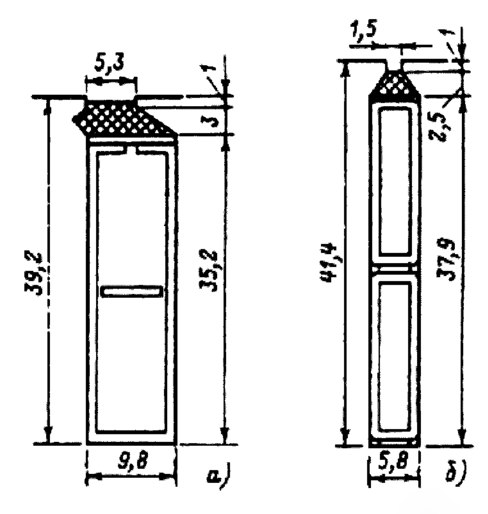


Рис. 9.76. Пазы спроектированного двигателя с фазным ротором (P_2 =132 кВт, 2р = 6, $U_{ном}$=380/660 В)

13. По (9.22)

$$\Phi = \frac{k_E U_{1Ном}}{4 k_B w_1 k_{об1} f_1} = \frac{0{,}98 \bullet 380}{4{,}44 \bullet 80 \bullet 0{,}95 \bullet 50} = 22{,}67 \cdot 10^{-3} \text{ Вб},$$

где k_E = 0,98 — по рис. 9.20.

14. По (9.23)

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{D l_\delta} = \frac{3 \bullet 22{,}67 \bullet 10^{3}}{0{,}425 \bullet 0{,}19} = 0{,}842 \text{ Тл}.$$

15. По (9.24)

$$q_{эф1} = \frac{I_{1НОМ}}{a J_1} = \frac{143}{3 \bullet 5{,}06 \bullet 10^6} = 9{,}42 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 9{,}42 \text{ мм}^2;$$

$$J_1 = \frac{A J_1}{A} = \frac{260 \bullet 10^9}{51{,}4 \bullet 10^3} = 5{,}06 \text{ А/м}^2$$

где по рис. 9.27, д (AJ_1) = 260 $\cdot 10^9$ А^2/м^2

Обмотку выполняем из подразделенных катушек; провод прямоугольный; $n_{эл}$ = 2. Предварительно

$q_{эл} = q_{эф}/n_{эл}$ = 9,42/2 = 4,71 мм^2

16. По (9.29)

$$b_{Z1min} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{B_{Z1MAX} l_{CT1} k_{C1}} = \frac{0{,}842 \bullet 18.54 \bullet 1 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19}{1{,}9 \bullet 0{,}19 \bullet 0{,}95} = 8{,}65 \text{ мм}$$

(по табл. 9.12 B_{Zmax} = 1,9 Тл; по табл. 9.13 k_{c1} = 0,95).

17. Предварительно

$b_п = t_{Z1} - b_{Z1min}$ = 18,54 - 8,65 = 9,89 мм;

по (9.35)

$b'_{эл} = 0{,}5(b_п - \Delta_{из}) = 0{,}5(b_п - 2b_{из} - \Delta b_п)$ = 0,5(9,89 - 2 • 1,1 - 0,3) = 3,7 мм

(по табл. 3.9 $b_{из}$ = 1,1 мм; по табл. 9.14 $\Delta b_п$ = 0,3 мм).

18. По табл. П 3.2 выбираем провод ПЭТП-155 $\dfrac{1{,}4x3{,}55}{1{,}52x3{,}67}$ $q_{эл}$ = 4,755 мм^2;

$q_{эф1} = q_{эл} n_{эл}$ = 4,755 • 2 = 9,51 мм^2.

19. Ориентируясь на табл. 3.9, составляем таблицу заполнения паза статора (табл. 9.39). Размеры паза в штампе (рис. 9.76, *а*) принимаем с учетом припусков $\Delta b_п$ и $\Delta h_п$ по (9.36).

20. По (9.27) уточняем

$$J_1 = \frac{I_{1НОМ}}{a q_{эф}} = \frac{143}{3 \bullet 9{,}51 \bullet 10^{6}} = 5{,}01 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Таблица 9.39 **Заполнение паза статора**

Наименование	Размер, мм	
	по ширине паза	по высоте паза
Обмоточный провод изолированный 1,52х3,67	3,67 x 2 = 7,34	1,52x20 = 30,4
Пазовая изоляция и допуск на укладку	2,2	4,5
Всего на паз без клина	9,54	34,9

21. По рис. 9.31 $\delta = 0{,}9$ мм.
22. $D_2 = D - 2\delta = 0{,}425 - 2 \cdot 0{,}9 \cdot 10^{-3} = 0{,}4232$ м.
23. Принимаем $l_2 = l_1 = 0{,}19$ м.

24. Обмотку ротора выполняем стержневой волновой с $q_2 = 4\frac{1}{2}$ тогда $Z_2 = 2\ p_2\ m_2\ q_2 = 2 \cdot 3 \cdot 4{,}5 = 81$.

25. $t_{z2} = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{\pi \bullet 0{,}4232}{81} = 16{,}44 \cdot 10^{-3} = 16{,}44$ мм

26. По (9.55)

$w_2 = 2\,p_2\,q_2 = 6 \cdot 4{,}5 = 27.$

27. Напряжение на контактных кольцах ротора при соединении обмотки ротора в звезду по (9.56)

$U_{к.к} = \sqrt{3}\,U_{1ном} = 222{,}1 \approx 220$ В.

28. По (9.57)

$I_2 = k_i\,I_1\,\nu_i = 0{,}904 \cdot 143 \cdot 2{,}87 = 371$ А

|по (9.58) $k_i = 0{,}2 + 0{,}8 \cos\varphi = 0{,}2 + 0{,}8 \cdot 0{,}88 = 0{,}904$];

по (9.59)

$$\nu_i = \frac{m_1 w_1 k_{об1}}{m_2 w_2 k_{об2}} = \frac{3 \bullet 80 \bullet 0{,}925}{3 \bullet 27 \bullet 0{,}955} = 2{,}87,$$

где по (3.20)

$$k_{ОБ2} = k_{p2} = \frac{0{,}5}{N \sin\left(\frac{\pi}{2mN}\right)} = \frac{0{,}5}{9 \sin\left(\frac{\pi}{2 \bullet 3 \bullet 9}\right)} = 0{,}955$$

при $q = 4\frac{1}{2}$; N = 2•4 + 1 = 9 (см. гл. 3).

29. По (9.60)

$q_{эф2} = I_2 / J_2 = 371/(5{,}7 \cdot 10^6) = 65{,}1 \cdot 10^{-6}\ м^2 = 65{,}1\ мм^2$,

принимаем $J_2 = 5{,}7 \cdot 10^6\ А/м^2$.

30. Предварительно $b_{п2} = 0{,}35\ t_{z2} = 0{,}35 \cdot 16{,}41 = 5{,}74$ мм, $b_{эл2} = b_{п2} - 2b_{из} - \Delta b_п = 5{,}74 - 1{,}7 - 0{,}3 = 3{,}74$ мм [$2b_{из} = 1{,}7$ мм по табл. 3.11, $\Delta b_п = 0{,}3$ мм по табл. 9.12]. По табл. П 3.2 выбираем неизолированный провод с $a = 3{,}8$ мм, $b = 16{,}8$ мм, $q_{эф2} = 63{,}36\ мм^2$.

31. Уточняем J_2

$J_2 = I_2 / q_{эф2} = 371/(63{,}36 \cdot 10^{-6}) = 5{,}86 \cdot 10^6\ А/м^2$.

32. Ориентируясь на табл. 3.11, составляем таблицу заполнения паза ротора (табл. 9.40). Размеры паза в штампе (рис. 9.76, 6) принимаем с учетом припусков $\Delta b_п$ и $\Delta h_п$ (см. табл. 9.12).

Таблица 9.40. Заполнение паза ротора

Наименование	Размеры на паз, мм	
	по ширине	по высоте
Стержни обмотки — неизолированная медь 3,8 х 16,8	3,8	16,8 х 2 = 33,6
Пазовая изоляция и допуск на укладку	1,7	4
Всего на паз без клина	5,5	37.6

33. По (9.102)

$D_в = k_в D_a = 0{,}23 \bullet 0{,}59 = 0{,}136$ м

(по табл. 9.19 для h = 315 мм и 2p = 6 $k_в$ = 0,23). Принимаем $D_в = D_j$ = 0,14м. В роторе выполняем 12 аксиальных каналов; $d_{к2}$ = 30 мм, $m_{к2}$ = 1.

Расчет магнитной цепи

Магнитопровод двигателя выполняем из стали марки 2312.

34. Магнитное напряжение воздушного зазора по (9.103)

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta k_\delta = 1{,}59 \bullet 10^6 \bullet 0{,}842 \bullet 0{,}9 \bullet 10^{-3} \bullet 1{,}21 = 1458 \text{ А}$$

по (4.19) $k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} = 1{,}183 \bullet 1{,}023 = 1{,}21$, где по (4.17) и (4.18)

где

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - \gamma_1 \delta} = \frac{18{,}54}{18{,}54 - 3{,}18 \bullet 0{,}9} = 1{,}183,$$

где

$$\gamma_1 = \frac{(b_{Ш1}/\delta)^2}{5 + b_{Ш1}/\delta} = \frac{(5{,}3/0{,}9)^2}{5 + 5{,}3/0{,}9} = 3{,}18;$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{Z2}}{t_{Z2} - \gamma_2 \delta} = \frac{16{,}41}{16{,}41 - 0{,}417 \bullet 0{,}9} = 1{,}023,$$

$$\gamma_2 = \frac{(b_{Ш2}/\delta)^2}{5 + b_{Ш2}/\delta} = \frac{(1{,}5/0{,}9)^2}{5 + 1{,}5/0{,}9} = 0{,}417.$$

35. Магнитное напряжение зубцовой зоны статора по (9.104)

$F_{z1} = 2h_{z1} H_{z1} = 2 \bullet 39{,}2 \bullet 10^{-3} \bullet 1514 = 118{,}7$ А,

где для паза по рис. 9.28, б $h_{z1} = h_п$ = 39,2 (рис. 9.76, а);

по (9.105)

$$B_{Z1max} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{B_{Z1max} l_{CT1} k_{C1}} = \frac{0{,}842 \bullet 18{,}54 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19}{9{,}09 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19 \bullet 0{,}95} = 1{,}81 \text{ Тл};$$

$$B_{Z1max} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{B_{Z1max} l_{CT1} k_{C1}} = \frac{0{,}842 \bullet 18{,}54 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19}{12{,}16 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19 \bullet 0{,}95} = 1{,}35 \text{ Тл},$$

где по табл. 9.15 (рис. 9.76, *а* и 9.28, б)

$$b_{Z1min} = \frac{\pi[D + 2(h_Ш + h_K)]}{Z_1} - b_П = \pi \frac{0{,}425 + 2(3+1) \bullet 10^{3}}{72} - 9{,}8 \bullet 10^{3} = 9{,}09 \bullet 10^{-3} \text{ м} = 9{,}09 \text{ мм};$$

$$b_{Z1max} = \frac{\pi(D + 2h_П)}{Z_1} - b_П = \pi \frac{0{,}425 + 2 \bullet 39{,}2 \bullet 10^{3}}{72} - 9{,}8 \bullet 10^{3} = 12{,}16 \bullet 10^{-3} \text{ м} = 12{,}16 \text{ мм};$$

$$B_{Z1cp} = \frac{B_{Z1max} + B_{Z1min}}{2} = \frac{1{,}81 + 1{,}35}{2} = 1{,}58 \text{ Тл}.$$

Напряженность поля в сечениях зубца по табл. П 1.10:

H_{z1max} = 2800 А/м для B_{z1max} = 1,81 Тл;

H_{z1cp} = 1370 А/м для B_{z1cp} = 1,58 Тл;

H_{z1min} = 804 А/м для B_{z1min} = 1,35 Тл.

Средняя напряженность поля

$$H_{z1} = \frac{1}{6}(H_{z1max} + 4 H_{z1cp} + H_{z1min}) = \frac{1}{6}(2800 + 4 \bullet 1370 + 804) = 1514 \text{ А}.$$

36. Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора [по (9.108)]

$F_{z2} = 2h_{z2} H_{z2} = 2 \bullet 41{,}4 \bullet 10^{-3} \bullet 2285 = 189{,}2$ А,

по табл. 9.20 (см. рис. 9.32, б и 9.76, б)
$h_{Z2} = h_{П2} = 41{,}4$ мм;
по (9.109)

$$b_{Z2\max} = \pi \frac{D_2 - 2(h_{Ш} - h_{К})}{Z_2} - b_{П2} = \pi \frac{0{,}4232 - 2(1 + 2{,}5) \bullet 10^{3}}{81} - 5{,}8 \bullet 10^{3}$$
$= 10{,}34 \cdot 10\text{-}3$ м;

$$b_{Z2\min} = \pi \frac{D_2 - 2h_{П2}}{Z_2} - b_{П2} = \pi \frac{(423{,}2 - 2 \bullet 41{,}4) \bullet 10^{3}}{81} - 5{,}8 \bullet 10^{3} = 7{,}4 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

по (9.109)

$$B_{Z2\max} = \frac{B_\delta t_{Z2} l_\delta}{B_{Z1\max} l_{CT2} k_{C2}} = \frac{0{,}842 \bullet 16{,}41 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19}{7{,}4 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19 \bullet 0{,}95} = 1{,}97 \text{ Тл};$$

$$BZ2max = \frac{B_\delta t_{Z2} l_\delta}{B_{Z2\max} l_{CT2} k_{C2}} = \frac{0{,}842 \bullet 16{,}41 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19}{10{,}34 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19 \bullet 0{,}95} = 1{,}41 \text{ Тл},$$

$$B_{Z2ср} = \frac{B_{Z2\max} + B_{Z2\min}}{2} = \frac{1{,}97 + 1{,}41}{2} = 1{,}69 \text{ Тл}.$$

Так как $B_{Z2max} = 1{,}97 > 1{,}8$ Тл, необходимо учесть вытеснение потока в паз в сечении зубца. По (4.33)

$$k_{П} = \frac{b_{П2} l_\delta}{b_{Z\min} l_{CT2} k_{C2}} = \frac{5{,}8 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19}{7{,}4 \bullet 0{,}19 \bullet 0{,}95} = 0{,}83$$

Примем действительную индукцию $B_{Z2max} = 1{,}96$ Тл, соответствующая ей напряженность (по табл. П 1.10) $H_{Z2max} = 5430$ А. Подставим полученные значения в уравнение (4.32):

$B_{Z2max} = B'_{Z2max} - \mu_0 H_{Z2max} k_{П};$

$B_{Z2max} = 1{,}97 - 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5430 \cdot 0{,}83 = 1{,}96.$

Действительная индукция в зубце $B_{Z2max} = 1{,}96$ Тл.

По табл. П 1.10

$H_{Z2max} = 5430$ А/м для $B_{Z2max} = 1{,}96$ Тл;

$H_{Z2ср} = 1840$ А/м для $B_{Z2ср} = 1{,}69$ Тл;

$H_{Z2min} = 917$ А/м для $B_{Z2min} = 1{,}41$ Тл.

Расчетная напряженность поля

$$H_{Z2} = \frac{1}{6}(H_{Z2max} + 4H_{Z2ср} + H_{Z2min}) = \frac{1}{6}(5430 + 4 \cdot 1840 + 917) = 2285 \text{ А/м}.$$

37. Коэффициент насыщения зубцовой зоны

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{119 + 189}{1459} = 1{,}21$$

38. Магнитное напряжение ярма статора по (9.116)

$F_a = L_a H_a = 0{,}286 \cdot 763 = 218{,}2$ А,

где по (9.119)

$$L_a = \pi \frac{D_a - h_a}{2p} = \pi \frac{0{,}59 - 0{,}0433}{6} = 0{,}286 \text{ м};$$

[по (9.120)

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{П1} = \frac{0{,}59 - 0{,}425}{2} - 39{,}2 \bullet 10^{3} = 43{,}3 \bullet 10^{-3} \text{ м};$$

по табл. П 1.9 для

$$B_a = \frac{\Phi}{2h_a l_{CT1} k_{C1}} = \frac{22{,}67 \bullet 10^{3}}{2 \bullet 43{,}3 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19 \bullet 0{,}95} = 1{,}45 \text{ Тл},$$

где $h'_a = h_a = 43{,}3 \bullet 10^{-3}$ м, находим $H_a = 763$ А/м].

39. Магнитное напряжение ярма ротора по (9.121)

$F_j = L_j H_j = 0{,}126 \cdot 186 = 23{,}4$ А,

где по (9. 127)

$$L_j = \frac{\pi(D_J + h_j)}{2P} = \frac{\pi(0{,}14 + 0{,}1)}{6} = 0{,}126 \text{ м};$$

$$h_J = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{\Pi 2} = \frac{0{,}4232 - 0{,}14}{2} - 41{,}4 \bullet 10^{3} = 0{,}1 \text{ м};$$

по (9.122)

$$B_j = \frac{\Phi}{2 h_j l_{CT2} k_{C2}} = \frac{22{,}67 \bullet 10^{3}}{2 \bullet 80{,}2 \bullet 10^{3} \bullet 0{,}19 \bullet 0{,}95} = 0{,}78 \text{ Тл};$$

по (9.123)

$$h_J = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{\Pi 2} - \frac{2}{3} d_{k2} m_{k2} = \frac{0{,}4232 - 0{,}14}{2} - 41{,}4 \bullet 10^{3} - \frac{2}{3} 0{,}03 = 80{,}2 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

по табл. П 1.9 для $B_j = 0{,}78$ Тл находим $H_j = 186$ А/м.

40. Магнитное напряжение цепи на два полюса по (9.128)

$F_ц = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 145{,}8 + 119 + 189 + 218 + 23 = 2007$ А.

41. Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя по (9.129)

$k_\mu = F_ц / F_\delta = 2007/1458 = 1{,}38$.

42. Намагничивающий ток по (9.130)

$$I_\mu = \frac{p F_Ц}{0{,}9 m_1 w_1 k_{ОБ1}} = \frac{3 \bullet 2007}{0{,}9 \bullet 3 \bullet 80 \bullet 0{,}925} = 30{,}1 \text{ А};$$

по (9.131)

$I_{\mu *} = I_\mu / I_{ном} = 30{,}1/143 = 0{,}21$.

Расчет параметров

43. Активное сопротивление обмотки статора по (9.132)

$$r_1 = k_R \rho_v \frac{L_1}{q_{эф1} a} = \frac{10^{6} \bullet 84{,}5}{41 \bullet 9{,}51 \bullet 10^{6} \bullet 3} = 0{,}0722 \text{ Ом},$$

где

$K_R = 1$;

$\rho_{115} = 10^{-6}/41$ Ом•м;

$q_{эф1} = 9{,}51 \cdot 10^{-6}$ м^2 (см. п. 18 расчета);

$a = 3$;

$L_1 = w_1 l_{ср1} = 80 \cdot 1{,}056 = 84{,}5$м;

$l_{ср1} = 2(l_{п1} + l_{л1}) = 2(0{,}19 + 0{,}338) = 1{,}056$ м; $l_{п1} = 0{,}19$ м;

$l_{л1} = К_л b_{кт} + 2В + h_п = 1{,}23 \cdot 0{,}202 + 2 \cdot 0{,}025 + 0{,}0392 = 0{,}338$ м,

где по (9.138)

$$b_{КТ1} = \frac{\pi(D + h_{П1})}{2p} \beta = \frac{\pi(0{,}425 + 0{,}0392)}{6} = 0{,}833 = 0{,}202 \text{ м};$$

по (9.142)

$$K_л = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}58^2}} = 1{,}23;$$

по (9.144)

$$m = \frac{b+s}{t_{Z1}} = \frac{7{,}34+3{,}5}{18{,}54} = 0{,}58;$$

$(b+s)$ — расстояние между осями соседних катушек статора в лобовых частях (см. рис. 9.49):

$b = 2b_{эл} = 2 \cdot 3{,}67 = 7{,}34$ мм;

$s = 3{,}5$ мм по табл. 9.24.

44. Вылет лобовых частей обмотки статора по (9.140)

$l_{выл} = К_л\, b_{кт} + В + 0{,}5\, h_п = 0{,}36 \cdot 0{,}202 + 0{,}025 + 0{,}5 \cdot 0{,}039 = 0{,}117$ мм,

где по (9.143)

$$K_{ВЫЛ} = 0{,}5K_Л m = 0{,}5 \cdot 1{,}23 \cdot 0{,}58 = 0{,}36$$

($b_{кт1}$, $К_л$ и m — по п. 43 расчета; В — из табл. 9.24; $h_{п1}$ — по рис. 9.76, а).

45. Активное сопротивление обмотки ротора по (9.132)

$$r_2 = К_R\, \rho_\upsilon \frac{L}{q_{ЭФ2}\, a_2} = \frac{10^{6} \bullet 27{,}5}{41 \bullet 63{,}36 \bullet 10^{6}} = 0{,}0106 \text{ Ом},$$

где

$К_R = 1$

$q_{эф2} = 63{,}36$ мм^2 (см. п. 30 расчета);

$L_2 = w_2\, l_{ср2} = 27 \cdot 1{,}02 = 27{,}5$ м;

$l_{ср2} = 2(l_{п2} + l_{л2}) = 2(0{,}19 + 0{,}32) = 1{,}02$ м;

$l_{п2} = 0{,}19$;

по (9.145)

$l_{л2} = К_{л2}\, b_{кт} + 2В_с = 1{,}1 \cdot 0{,}2 + 2 \cdot 0{,}05 = 0{,}32$ м,

где по (9.148)

$$m = \frac{b_{CT} + S_{CT}}{t_{Z2}} = \frac{3{,}8+1{,}7}{13{,}2} = 0{,}42;$$

$b_{ст} = 3{,}8$ — по п. 30 расчета; $S_{ст} = 1{,}7 \cdot 10^{-3}$ м — по табл. 9.25;

по (9.142)

$$K_л 2 = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0{,}42^2}} = 1{,}1;$$

$В_с = 0{,}05$;

по (9.147)

$$b_{КТ2} = \frac{\pi(D_2 - h_{П2})}{2p} = \frac{\pi(0{,}4232 - 0{,}414)}{6} = 0{,}2 \text{ м}.$$

По (9.150)

$r'_2 = v_{12}\, r_2 = 8{,}24 \cdot 0{,}0106 = 0{,}0873$ Ом,

где по (9.151)

$$v_{12} = \frac{m_1 (w_1 k_{ОБ1})^2}{m_2 (w_2 k_{ОБ2})^2} = \frac{3(80 \bullet 0{,}925)^2}{3(27 \bullet 0{,}955)^2} = 8{,}24;$$

$$r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} = \frac{0,0873 \bullet 143}{380} = 0,033.$$

46. Вылет лобовых частей обмотки ротора по (9.146)

$l_{выл} = l_{выл} = К_л\, b_{кт} + В_с = 0,23 \bullet 0,2 + 0,05 = 0,096$ м,

где по (9.143)

$K_{ВЫЛ} = 0,5K_Л m = 0,5 \bullet 1,1 \bullet 0,42 = 0,23$

($b_{кт2}$, $В_с$, $К_{л2}$ и m — по п. 45 расчета).

Индуктивное сопротивление обмотки статора

47. По табл. 9.26 и рис. 9.50, б

$$\lambda_{П2} = \frac{h_2 - h_0}{3b_П} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_П} + \frac{3h_K}{b_П + 2b_Ш} + \frac{h_Ш}{b_Ш}\right) k_\beta + \frac{h_0}{4b_П} = \frac{33,8 - 1,4}{3 \bullet 9,8} 0,906 + \left(\frac{0,7}{9,8} + \frac{3 \bullet 3}{9,8 + 2 \bullet 5,3} + \frac{1}{5,3}\right) 0,875 + \frac{1,4}{4 \bullet 9,}$$

$= =1,65$;

по рис. 9.76, *а* с учетом данных табл. 3.9

$h_0 = 1 + \frac{0,2 + 0,6}{2} = 1,4$ мм;

$h_к = 3$ мм; $h_1 = 0,5 + \frac{0,2 + 0,6}{4} = 0,7$ мм;

$h_2 = 35,2 - 2 \bullet 0,7 = 33,8$ мм; $h_ш = 1$ мм; $b_ш = 5,3$ мм; $b_п = 9,8$ мм;

по (9.156)

$k'_\beta = 0,25(1 + 3\beta) = 0,25(1 + 3 \bullet 0,833) = 0,875$;

по (9.158)

$k_\beta = 0,25(1 + 3\, k'_\beta) = 0,25(1 + 3 \bullet 0,875) = 0,906$.

48. По (9.159)

$\lambda_л = 0,34\, \frac{q}{l_\delta} (l_л - 0,64\, \beta\, \tau) = 0,34 \frac{4}{0,19}$ (0,038 - 0,64 • 0,833 • 0,2225) = 1,57

0,19

($l_{л1} = 0,338$ м — по п. 43 расчета; $l_\delta = 0,19$ м).

49. По (9.160)

$$\lambda_Д = \frac{t_Z}{12\delta k_\delta} \xi = \frac{18,54}{12 \bullet 0,9 \bullet 1,21} 0,855 - 1,21$$

где по (9. 162)

$\xi = 2 + 0,022\, q^2 \quad k^2_{об}(1 + \Delta z) = 0,0034 \bullet 4^2 + 2 \bullet 0,875 - 0,925^2 (1 + 0,11) = 0,855$

($k'' = 0,0034$ — по рис. 9.51, в; $\Delta_z = 0,11$ — по рис. 9.51, а для $b_ш/\delta = 5,3/0,9 = 5,89$ и $b_ш/t_{z1} = 5,3/18,54 = 0,29$; k'_β — по п. 47 расчета).

50. По (9.152)

$$x_1 = 1,58\, \frac{f}{100} \left(\frac{w}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{p_1 q_1} (\lambda_{П1} + \lambda_{Л1} + \lambda_{Д1}) = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{80}{100}\right)^2 \frac{0,19}{3 \bullet 4} (1,65 + 1,57 + 1,21) = 0,355.$$

$$x_{1*} = x_1\, \frac{I_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} = 0,555 \frac{143}{380} = 0,134.$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора

51. По табл. 9.26 и рис. 9.50, ж:

$$\lambda_{П2} = \frac{h_2 - h_0}{3b_П} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_П} + \frac{3h_k}{b_П + 2b_Ш} + \frac{h_Ш}{b_Ш}\right) k_\beta + \frac{h_0}{4b_П} = \frac{35,5 - 1,6}{3 \cdot 5,8} + \frac{1,2}{5,8} + \frac{3 \cdot 2,5}{5,8 + 2 \cdot 1,5} + \frac{1}{1,5} + \frac{1,6}{4 \cdot 5,8} - 3,74$$

(по рис. 9.76, б с учетом данных табл. 3.11: $h_0 = 0,5 + 2,2/2 = 1,6$мм; $h_к = 2,5$ мм; $h_1 = 0,5 + 2,2/4 + 0,15 = 1,2$ мм; $h_2 = 37,9 - 2 \cdot 1,2 = 35,5$ мм; $h_ш = 1$ мм; $b_ш = 1,5$ мм; $b_п = 5,8$ мм; $k_\beta - k'_\beta = 1$).

52. По (9.159) коэффициент лобового рассеяния

$$\lambda_л = 0,34\ \frac{q}{l_\delta}(l_л - 0,64\ \beta\ \tau) = 0,34\frac{4,5}{0,19}(0,32 - 0,64 \cdot 0,2225) = 1,43$$

($l_{л2} = 0,32$ — по п. 45 расчета).

53. По (9.160) коэффициент дифференциального рассеяния

$$\lambda_{Д2} = \frac{t_{Z2}}{12\delta k_\delta}\xi = \frac{16,41}{12 \bullet 0,9 \bullet 1,31}1,46 = 1,83,$$

где по (9.163) для $q_2 = 4\frac{1}{2}$

$$\xi = k' q_2^2 + 2k'_\beta - k^2_{об}(\frac{1}{d^2} + \Delta z) = 0,0215 \cdot 4,5^2 + 2 \cdot 0,63 - 0,955^2\left(\frac{1}{2^2} + 0,01\right) = 1,46$$

($k'_\beta = 0,0215$ — по рис. 9.51, в для $\beta = 1$; $\Delta_z = 0,01$ — по рис. 9.51, *а* для $b_ш/\delta = 1,5/0,9 = 1,67$ и $b_ш/t_{Z2} = 1,5/16,41 = 0,09$; $k'_\beta = 0,63$ — по рис. 9.51, г для c/d = 1/2 и $\beta = 1$).

54. Индуктивное сопротивление обмотки ротора по (9.174)

$$x_2 = 1,58\ \frac{f}{100}(\frac{w_1}{100})^2\frac{l_\delta}{p_2 q_2}(\lambda_{П2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}) = 15,8\frac{50}{100}\left(\frac{27}{100}\right)^2\frac{0,19}{3 \bullet 4,5}(3,74 + 1,43 + 1,83) = 0,057\ Ом$$

$x'_2 = x_2\ \nu_{12} = 0,057 \cdot 8,24 = 0,47$,

где $\nu_{12} = 8,24$ из п. 45 расчета;

$x'_{2*} = x'_2\ I_{1ном} / U_{1ном} = 0,47 \cdot 143/380 = 0,177$.

Расчет потерь

55. По (9.187)

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/50}\ (\frac{f_1}{50})^2(k_{да}B_a^2 m_a + k_{дz}B_{cp}^2 m_{z1}) = 1,75(1,6 \cdot 1,45^2 \cdot 104,7 + 1,8 \cdot 1,58^2 \cdot 422) = 948,2\ Вт$$

[из табл. 9.26 для стали марки 2312 $p_{1,0/50} = 1,75$ Вт/кг; $k_{да} = 1,6$; $k_{дz} = 1,8$;

по (9.188)

$m_a = \pi(D_a - h_a)\ h_a\ l_{ст1}\ k_{c1}\ \gamma_c = \pi(0,59 - 0,0433) \cdot 0,0433 \cdot 0,19 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 104,7$ кг,

где $h_a = 0,0433$ м из п. 38 расчета;

по (9.189)

$m_{z1} = h_{z1} b_{z1ср}\ Z_1\ l_{ст1}\ k_{c1}\ \gamma_c = 72 \cdot 0,0392 \cdot 10,63 \cdot 10^{-3} \cdot 0,19 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 42,2$ кг,

где

$$b_{Z1cp} = \frac{b_{Z1\max} + b_{Z1\min}}{2} = \frac{12,16 + 9,09}{2} = 10,63\ мм;$$

из п. 35 и 38 расчета $B_a = 1,45$ Тл, $B_{z1ср} = 1,58$ Тл].

56. По (9.194)

$P_{пов2} = p_{пов2}(t_{z2} - b_{Ш2})Z_2 l_{ст2} = 647,7(16,41 - 1,5) \cdot 10^{-3} \cdot 81 \cdot 0,19 = 154,8$ Вт,

где по (9.192)

=0,5- 1,8”5 (0,336- 18.54)2 =674,

$$P_{пов2} = 0,5\ k_{02}\ (\frac{Z_1 n}{10000})^{1,5}(B_{0,2}\ t_{z1} \bullet 10^3)^2 = 0,5 \cdot 1,8\left(\frac{72 \bullet 1000}{10000}\right)^{1,5}(0,336 \bullet 18,54)^2 = 674,7\ Вт/м^2$$

[по (9.190 $B_{02} = \beta_{02}\, k_\delta\, B_\delta = 0{,}33 \cdot 1{,}21 \cdot 0{,}842 = 0{,}336$ Тл; по рис. 9.53, б для $b_{ш1}/\delta = 5{,}3/0{,}9 = 5{,}9$ находим $\beta_{02} = 0{,}33$].

57. По (9.200)

$$P_{пул2} \approx 0{,}11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{пул2}\right)^2 m_{z2} = 0{,}11\left(\frac{72 \bullet 1000}{1000} 0{,}147\right)^2 41{,}88 = 516{,}1 \text{ Вт}$$

[по (9.201)

$$m_{Z2} = Z_2\, h_{Z2}\, b_{Z2ср}\, l_{ст2}\, k_{c2}\, \gamma_c = 81 \cdot 41{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}00887 \cdot 0{,}19 \cdot 0{,}95 \cdot 7{,}8 \cdot 10^3 = 41{,}88 \text{ кг},$$

где

$$b_{Z2ср} = \frac{b_{Z2\max} + b_{Z2\min}}{2} = \frac{10{,}34 + 7{,}42}{2} = 8{,}87 \text{ мм};$$

по (9.196)

$$B_{пул2} = \frac{\gamma 1 \delta}{2 t_{z2}} B_{z2ср} = \frac{3{,}18 \bullet 0{,}9 \bullet 10^{3}}{2 \bullet 16{,}41 \bullet 10^{3}} 1{,}69 = 0{,}147 \text{ Тл},$$

где $\gamma_1 = 3{,}18$ из п. 34 расчета; $B_{Z2ср} = 1{,}69$ из п. 36 расчета].

58. По (9.202)

$$P_{ст.доб} = P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2} = 154{,}8 + 516{,}1 = 670{,}9 \text{ Вт};$$

по (9.203)

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 948{,}2 + 670{,}9 = 1619{,}1 \text{ Вт}.$$

59. По (9.211)

$$P_{мех} = 1{,}2 \bullet 2\,p\,\tau^3 (n_к + 1{,}1) \bullet 10^3 = 1{,}2 \cdot 6 \cdot 0{,}2225^3 \bullet 11 \bullet 10^3 = 872{,}4 \text{ Вт}.$$

60. По (9.214)

$$P_{тр.щ} = К_{тр}\, \rho_щ\, S_щ\, v_к = 0{,}16 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 10{,}47 = 201 \text{ Вт}$$

(по табл. П 4.2 выбираем щетки МГ, для которых $p_щ = 20 \cdot 103$ Па, $J_{ш.доп} = 20$ А/см^2, $v_{к.доп} = 20$ м/с; $\Delta U_щ = 0{,}2$В, $К_{тр} = 0{,}16$).

61. Площадь щеток на одно кольцо

$$S'_щ = I_2/J_щ = 371/20 = 18{,}55 \text{ см}^2;$$

по табл. П 4.1 принимаем $l_щ = 25$ мм, $b_щ = 20$ мм; число щеток на одно кольцо

$$n_Щ = \frac{S'_Щ}{b_Щ l_Щ} = \frac{18{,}55}{2{,}5 \bullet 2} = 3{,}71 \approx 4$$

Уточняем плотность тока под щеткой:

$$J_Щ = \frac{I_2}{b_Щ l_Щ n_Щ} = \frac{371}{2{,}5 \bullet 2 \bullet 4} = 18{,}55 \text{ А/см}^2$$

Принимаем диаметр кольца $D_к = 0{,}2$ м, тогда линейная скорость кольца

$$v_К = \frac{\pi D_К n}{60} = \frac{\pi \bullet 0{,}2 \bullet 1000}{60} = 10{,}47 \text{ м/с}.$$

62. Сумма потерь

$$P_{ст} + P_{мех} + P_{тр.щ} = 1{,}619 + 0{,}872 + 0{,}201 = 2{,}69 \text{ кВт}.$$

Холостой ход

63. По (9.217)

$$I_{x.x} = \sqrt{I^2_{x.x.a} + I^2_{x.x.p}} = \sqrt{2{,}54^2 + 30{,}1^2} = 30{,}2 \text{ А}$$

[$I_{x.x.p} = I_\mu = 30{,}1$ А — из п. 42 расчета;

по (9.218)

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{эл x.x}}{mU_{1ном}} = \frac{(2{,}69 + 0{,}2) \bullet 10^3}{3 \bullet 380} = 2{,}54 \text{ А}$$

где $P_{э1x.x} = 3\, I_\mu^2\, r_1 = 3 \bullet 30{,}1^2 \bullet 0{,}0722 = 196{,}2$ Вт = 0,2 кВт

($r_1 = 0{,}0722$ из п.43 расчета)]

64. По (9.221)

$\cos\varphi_{x.x} = I_{x.x.a}/I_{x.x} = 2{,}54/30{,}2 = 0{,}084.$

65. По (9.184)

$$r_{12} = P_{ст.осн} / (m\, I_\mu^2) = \frac{948{,}2}{3 \bullet 30{,}1^2} = 0{,}349 \text{ Ом};$$

$r_{12*} = r_{12}\, I_{1ном} / U_{1ном} = 0{,}349 \bullet 143/380 = 0{,}131.$

66. По (9.185)

$$x_{12} = \frac{U_{1НОМ} - I_\mu x_1}{I_\mu} = \frac{U_{1ном}}{I_\mu} - x_1 = 380/30{,}1 \bullet 0{,}353 = 12{,}27 \text{ Ом};$$

$x_{12*} = x_{12} I_{1ном}/U_{1ном} = 12{,}27 \bullet 143/380 = 4{,}6.$

Расчет рабочих характеристик

67. По (9.223)

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0{,}355}{12{,}27} = 1{,}029.$$

По (9.227)

$a' = c_1^2 = 1{,}029^2 = 1{,}059$; $b' = 0$; $a = c_1 r_1 = 1{,}029 \bullet 0{,}0722 = 0{,}0743$; $b = c_1(x_1 + c_1 x'_2) = 1{,}029(0{,}355 + 1{,}029 \bullet 0{,}47) = 0{,}863.$

По (9.226)

$$I_{0a} = \frac{P_{СТ.ОСН} + 3 I_\mu^2 r_1}{3U_{1НОМ}} = \frac{948{,}2 + 3 \bullet 30{,}1^2 \bullet 0{,}0722}{3 \bullet 380} = 1 \text{ А}.$$

Данные расчета рабочих характеристик для скольжении $s = 0{,}005$; 0,01; 0,015; 0,02; 0,03 и 0,04 сведены в таблицу 9.41. Номинальное скольжение $s = 0{,}034$ уточнено после построения характеристик (рис. 9.77).

Номинальные данные спроектированного двигателя: $P_2 = 132$ кВт; $U_1 = 380/660$ В; 2p = 6; $\eta = 0{,}91$; $\cos\varphi = 0{,}88$.

Для расчета максимального момента определяем критическое скольжение:

$$s_{КР} = \frac{r_2'}{x_1 / c_1 + x_2'} = \frac{0{,}0873}{0{,}355/1{,}029 + 0{,}47} = 0{,}107;$$

M_{max*} находим по 1—5-й и 11-й строкам табл. 9.41 для $s = s_{кр}$;

$R = a + a' r'_2/s_{кр} = 0{,}0743 + 1{,}059/0{,}107 = 0{,}938$ Ом;

$X = b + b' r'_2/s_{кр} = 0{,}863$ Ом;

$$I_2' = c_1 \frac{U_{1НОМ}}{\sqrt{R^2 + X^2}} = 1{,}029 \frac{380}{\sqrt{0{,}938^2 + 0{,}863^2}} = 306{,}8 \text{ А}.$$

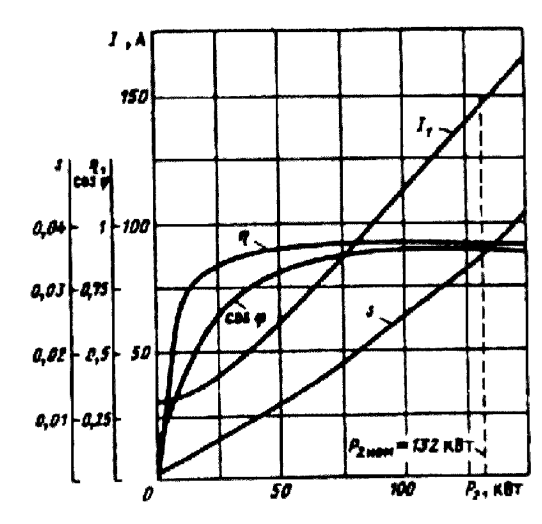


Рис. 9.77. Рабочие характеристики спроектированного двигателя с фазным ротором ($P_{2ном}$=132 кВт, 2р = 6, $U_{ном}$ = 380/660 В, $I_{1ном}$=147 А, $\eta_{ном}$ = 0,9; $\cos\varphi_{ном}$ = 0,88, $s_{ном}$ = 0,034)

Т а б л и ц а 9.41. Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором

P_2 = 132 кВт; U_1 = 380/660 В; 2р = 6; r_1 = 0,0722 Ом; r'_2 = 0,0873 Ом; $P_{ст} + P_{мех} + P_{тр.щ}$ = 2,69 кВт; I_{0a} = 1 А; $I_{0p} = I_\mu$ = 30,1 А; c_1 = 1,029; a' = 1,059; a = 0,0726 Ом; b' = 0; b = 0,863 Ом

№ п/п	Расчетная формула	Размерность	Скольжение						
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,03	0,04	$S_{ном}$= =0,034
1	$a r_2 / s$	Ом	18,5	9,25	6,16	4,62	3,08	2,31	2,72
2	$R = a + a r_2 / s$	Ом	18,57	9,32	6,23	4,69	3,15	2,38	2,79
3	$X = b + b r_2 / s$	Ом				0,863			
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	18,59	9,36	6,29	4,77	3,27	2,53	2,92
5	$I_2 = U_{1НОМ} / Z$	А	20,44	40,6	60,41	79,66	116,2	150,2	130,1
6	$\cos\varphi_2 = R/Z$	-	0,999	0,996	0,99	0,983	0,963	0,941	0,955
7	$\sin\varphi_2 = X/Z$	-	0,046	0,092	0,137	0,181	0,264	0,341	0,296
8	$I_{1a} = I_{0a} + I_2 \cos\varphi_2$	А	21,42	41,44	60,81	79,31	112,9	142,3	125,2
9	$I_{1p} = I_{0p} + I_2 \sin\varphi_2$	А	31,04	33,84	38,38	44,52	60,78	81,31	68,61
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	37,71	53,50	71,91	90,95	128,2	163,9	142,8
11	$I_2 = c_1 I_2$	А	21,03	41,78	62,16	81,97	119,6	154,6	139,9
12	$P_1 = 3 U_{1ном} I_{1a} 10^{-3}$	кВт	24,42	47,24	69,32	90,41	128,7	162,2	142,7
13	$P_{э1} = 3 I_1^2 r_1 10^{-3}$	кВт	0,31	0,62	1,12	1,79	3,56	5,82	4,42
14	$P_{э2} = 3 (I_1^1)^2 r'_2 10^{-3}$	кВт	0,12	0,46	1,01	1,76	3,75	6,26	4,7
15	$P_{э.щ} = 3\Delta U_{щ} I_2 10^{-3}$	кВт	0,04	0,07	0,11	0,14	0,21	0,27	0,23
16	$P_{доб} = 0,005 P_1$	кВт	0,12	0,24	0,35	0,45	0,64	0,81	0,71
17	ΣP	кВт	3,28	4,08	5,28	6,83	10,85	15,85	12,75
18	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	21,14	43,16	64,04	83,58	117,9	146,4	130
19	$\eta = 1 - \sum P / P_1$	-	0,866	0,914	0,924	0,924	0,916	0,903	0,911
20	$\cos\varphi = I_{1a}/I_1$	-	0,568	0,775	0,846	0,87	0,881	0,868	0,877

$$M_{max*} = \frac{M_{max}}{M_{НОМ}} = \left(\frac{I_2}{I_{2НОМ}}\right)^2 \frac{s_{НОМ}}{s_{КР}} = \left(\frac{306,8}{133,9}\right)^2 \frac{0,034}{0,107} = 1,67.$$

Для более точного определения $s_{кр}$ и M_{max} следует построить зависимость $M = f(s)$ для диапазона изменения s = 0,1..1 и при этом учесть влияние насыщения полями рассеяния головок зубцов на индуктивные сопротивления обмоток статора и ротора по формулам § 9.13. Последовательность расчета зависимости $M = f(s)$ с учетом влияния насыщения показана в примере расчета асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Вывод: по техническим данным спроектированный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ и технического задания.

Глава десятая. **Проектирование синхронных машин**

Синхронные машины имеют широкое распространение и выпускаются в большом диапазоне мощностей и частот вращения. В энергетике их применяют в качестве генераторов на электростанциях, их мощность составляет 1500 МВт для турбогенераторов и 800 МВт для гидрогенераторов. В промышленных установках большое применение находят синхронные двигатели и генераторы.

10.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Синхронные двигатели предназначены для привода механизмов, не требующих регулирования частоты вращения, таких, как компрессоры, насосы, шаровые мельницы, вентиляторы, двигатель-генераторные установки и т. п.

Двигатели изготовляют с неявнополюсным и с явнополюсным ротором.

В неявнополюсном исполнении синхронных двигателей — турбодвигатели — выпускают с частотой вращения 3000 об/мин мощностью от 630 до 12500 кВт. Более широкое распространение имеют явнополюсные синхронные двигатели с диапазоном частот вращения от 1500 до 100 об/мин мощностью от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч киловатт.

Шкала мощностей выпускаемых в настоящее время двигателей приведена в табл. 10.1. Двигатели выпускают с номинальными напряжениями 380,660,6000 и 10000 в [16].

В отдельных случаях допускается изготовление двигателей на напряжение 3000 В для мощностей, указанных в таблице для двигателей с номинальным напряжением 6000 В.

Синхронные генераторы выполняют с явнополюсными роторами и применяют в сопряжении с двигателями внутреннего сгорания или электродвигателями. В табл. 10.2 приведена шкала мощностей, частот вращения и напряжений для синхронных генераторов. Для дизель-агрегатов выпускают генераторы с частотой вращения 375 об/мин. Кроме того, выпускают синхронные генераторы небольших мощностей; от 4 до 100 кВт. Большинство выпускаемых генераторов работает с самовозбуждением и автоматической системой регулирования возбуждения.

Налажено серийное производство различного типа синхронных двигателей мощностью от нескольких сотен ватт до долей ватта (микродвигатели) [16].

Таблица 10.1. **Шкала мощностей синхронных двигателей**

Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин													
	3000				1500				1000				750	
	Номинальное напряжение, В													
	6000	10000	380	660	6000	10000	380	660	6000	10000	380	660	6000	10000
75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X	—	—	—
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X	—	—	—
110	—	—	—	—	—	—	X	—	—	—	X	—	—	—
132	—	—	X	—	—	—	X	—	—	—	X	—	—	—
160	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—
200	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—
250	—	—	X	X	X	—	X	X	X	—	X	X	X	—
315	—	—	X	X	X	—	X	X	X	—	—	—	X	—
400	—	—	—	X	X	—	—	—	X	—	—	—	X	—
500				X	X		—	—	X	—		—	X	—
630	X	X	—	—	X	—	—	—	X	—	—	—	X	X
800	X	X		—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X
1000	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X
1600	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X
1250	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X
2000	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X
2500	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X
3200	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X
4000	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X
5000	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X	—	—	X	X
6300	X	X	—	—	—	—	—	—	X	X	—	—	X	X
8000	X	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	X	X
10000	X	X			—		—						X	X
12500	X	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. 10.1

Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин											
	600			500			375		300		250	
	Номинальное напряжение, В											
	380	6000	10000	380	6000	10000	6000	10000	6000	10000	6000	10000
75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
90	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
110	X	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
132	X	—	—	X	—	—	—	—	—	—	—	—
160	X	—	—	X	—	—	—	—	—	—	—	—
200	X	—	—	X	—	—	—	—	—	—	—	—
250	X	X	—	X	X	—	—	—	—	—	—	—
315	X	X	—	—	X	—	X	—	X	—	X	—
400		X	—	—	X	—	X	—	X	—	X	—
500	—	X	—	—	X	—	X	—	X	—	X	—
630	—	X	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X
800	—	X	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X
1000	—	X	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X
1600	—	X	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X
1250	—	X	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X
2000		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X
2500		X	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X
3200		X	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X
4000	—	X	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X
5000	—	X	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X
6300	—	X	X	—	X	X	X	X	X	X	X	X
8000	—	X	X	—	X	X	X	X	—	—	—	—
10000		X	X		X	X	—					
12500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 10.2. Ш**кала мощностей синхронных генераторов**

Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин										
	1500			1000			705		600	500	
	Номинальное напряжение, В										
	230	400	6300	230	400	6300	230	400	400	230	400
75	—	—	—	X	X	—	X	X	—	—	—
100	X	X	—	X	X	—	X	X	—	—	—
125	—	X	—	X	X	—	—	—	X	X	X
160	—	X	—	—	—	—	X	X	X	X	X
200		X	—	—	—	—	X	X	X	X	X
250	—	—	—	—	—	—	X	X	X	—	X
320	—	X	—	—	X	X	—	—	—	—	X
400	—	X	—	—	X	—	—	—	—	—	—
500	—	X	X	—	X	X	—	—	—	—	—
630	—	X	X	—	X	X	—		—	—	—
800	—	—	—	—	—	X	—	—	—	—	—

Расчет синхронных машин каждого вида имеет свои особенности. В этой главе изложена методика расчета синхронных явнополюсных машин общего назначения.

Основное конструктивное исполнение таких машин — с горизонтальным расположением вала. По способу защиты и вентиляции — защищенные или закрытые с самовентиляцией. Охлаждение — воздушное.

В настоящее время для синхронных машин не существует жесткой увязки мощностей с установочными размерами и высотой оси вращения, как это имеется, например, у асинхронных машин.

Синхронные машины общего назначения выпускают в виде ряда серий. Каждая серия включает в себя машины в определенном диапазоне мощностей и частот вращения, их выполняют на нескольких нормализованных внешних диаметрах статора, которые определяют габарит машины. При одной и той же частоте вращения две-четыре машины близких мощностей имеют одинаковую поперечную геометрию и отличаются длиной.

Неявнополюсные синхронные двигатели общего назначения выпускают сериями СД2, СДН2, СДН3-2 и др. Серию двигателей СД2 выпускают на внешних диаметрах статора, соответствующих 13-му и 14-му габаритам, серию СДН2 — на диаметрах 16-го и 17-го габаритов, а серию СДН3-2 — на диаметрах 18—21-го габаритов. Синхронные генераторы выпускают сериями СГ2 (13-й и 14-й габариты), СГД2 (16-й и 17-й габариты) и др. Конструктивно синхронные генераторы подобны синхронным двигателям соответствующего габарита. Кроме того, выпускают синхронные генераторы серий ОС, ЕСС, ЕСС5 и другие в диапазоне мощностей от 4

до 100 кВт (5—9-й габариты) на напряжение 230 и 400 В при частоте вращения 1500 об/мин [15].

Турбо- и гидрогенераторы большей мощности в данном учебнике не рассматриваются.

10.2. КОНСТРУКЦИЯ СЕРИЙНЫХ СИНХРОННЫХ МАШИН ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Как уже отмечалось, синхронные машины общего назначения с явнополюсным ротором выпускают в виде отдельных серий. Каждая серия включает ряд машин в определенном диапазоне мощностей, объединенных общностью конструкции. Машины различных серий могут конструктивно отличаться друг от друга, но наряду с этим в выполнении отдельных узлов иметь и много общего. Конструкции современных синхронных машин средней мощности показаны на рис. 10.1—10.4. На рис. 10.1—10.3 одинаковые детали и узлы обозначены одними и теми же цифрами.

Конструктивно машины указанных серий выполнены с различными степенями защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями и от попадания внутрь машины посторонних тел и воды. В соответствии с классификацией, предусмотренной ГОСТ, машины серии СД2 (СГ2) имеют степень защиты IP23. Основное исполнение серии СДН2 имеет степень защиты IP11, но также выпускаются модификация со степенью защиты IP43. Машины серии СДН3-2 имеют закрытое исполнение со степенью защиты IP44.

Машины различаются по способу крепления и конструкции подшипниковых узлов. В машинах серии СД2 (СГ2) подшипники размещают в подшипниковых щитах, и, следовательно, машины имеют форму исполнения IM1001. В машинах серий СДН2 и СДН3-2 применяют стояковые подшипники, и они имеют форму исполнения IM7311. Машины серии СДН2 (см. рис. 10.2) выполняют без фундаментной плиты, а стояковые подшипники *1* устанавливают на нижних подшипниковых полущитах *2*, крепящихся к нижней части статора. Такое исполнение позволило сократить расстояние между подшипниками по сравнению с вариантом крепления стояковых подшипников на фундаментной плите и привело к уменьшению общей массы машины. По сравнению с вариантом расположения подшипников в подшипниковых щитах принятая конструкция также имеет преимущества, так как обеспечивает выполнение машины на подшипниках скольжения и качения с одинаковыми габаритно-установочными размерами, большую гарантию от попадания масла из подшипников скольжения в машину, уменьшает вероятность возникновения вибраций и т. д. Крепление двигателей к фундаменту производят шпильками, проходящими через отверстия в лапах станины.

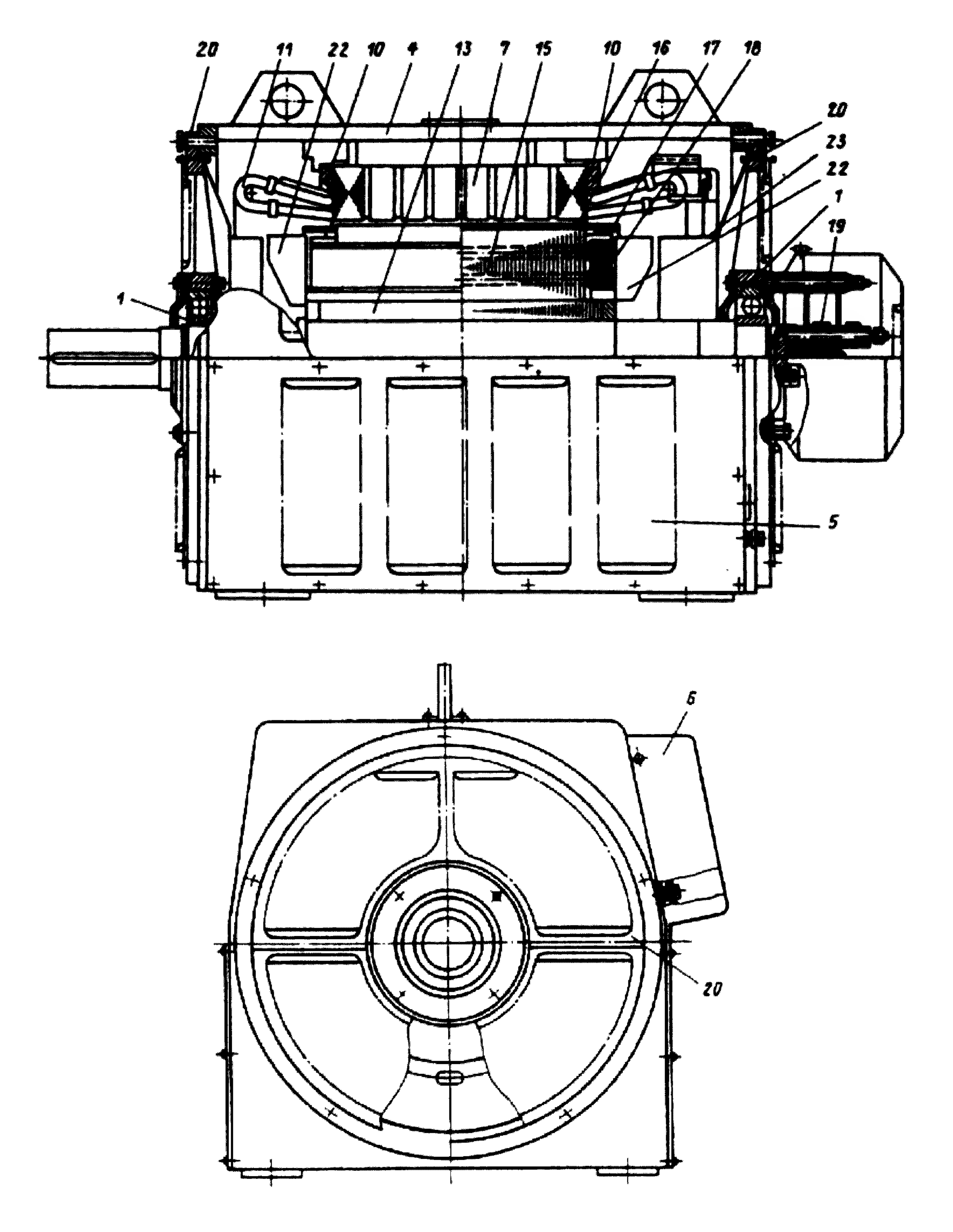


Рис. 10.1. Синхронный двигатель серии СД2

Двигатели серии СДН3-2 (рис. 10.3) вместе со стояковыми подшипниками *1* крепят на фундаментной плите *3* или фундаментных балках.

В машинах серии СД2 применяют подшипники качения: со стороны контактных колец — однорядные шариковые подшипники и со стороны привода — однорядные роликовые. В машинах серии СДН2 используют как подшипники скольжения, так и

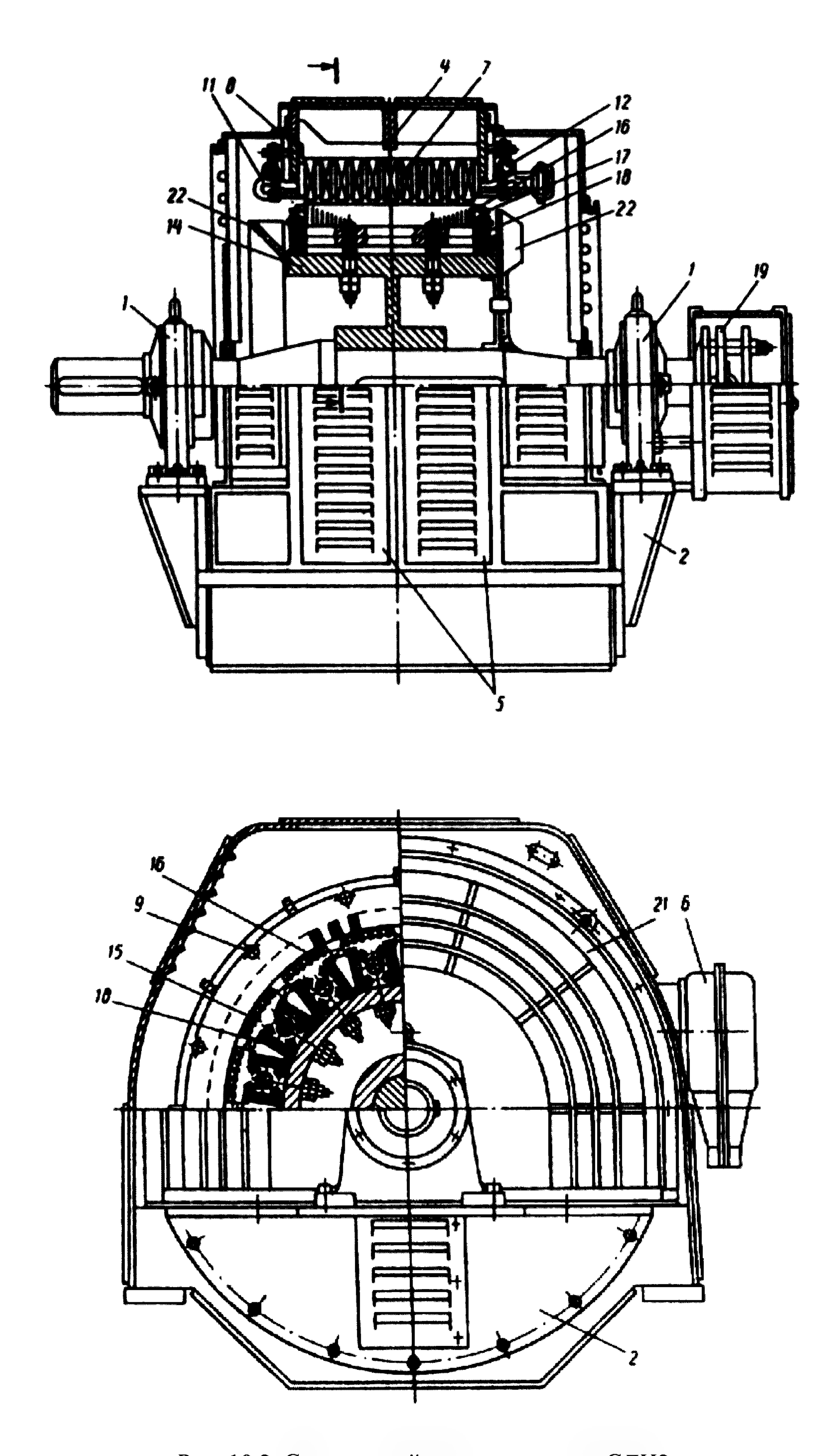


Рис. 10.2. Синхронный двигатель серии СДН2

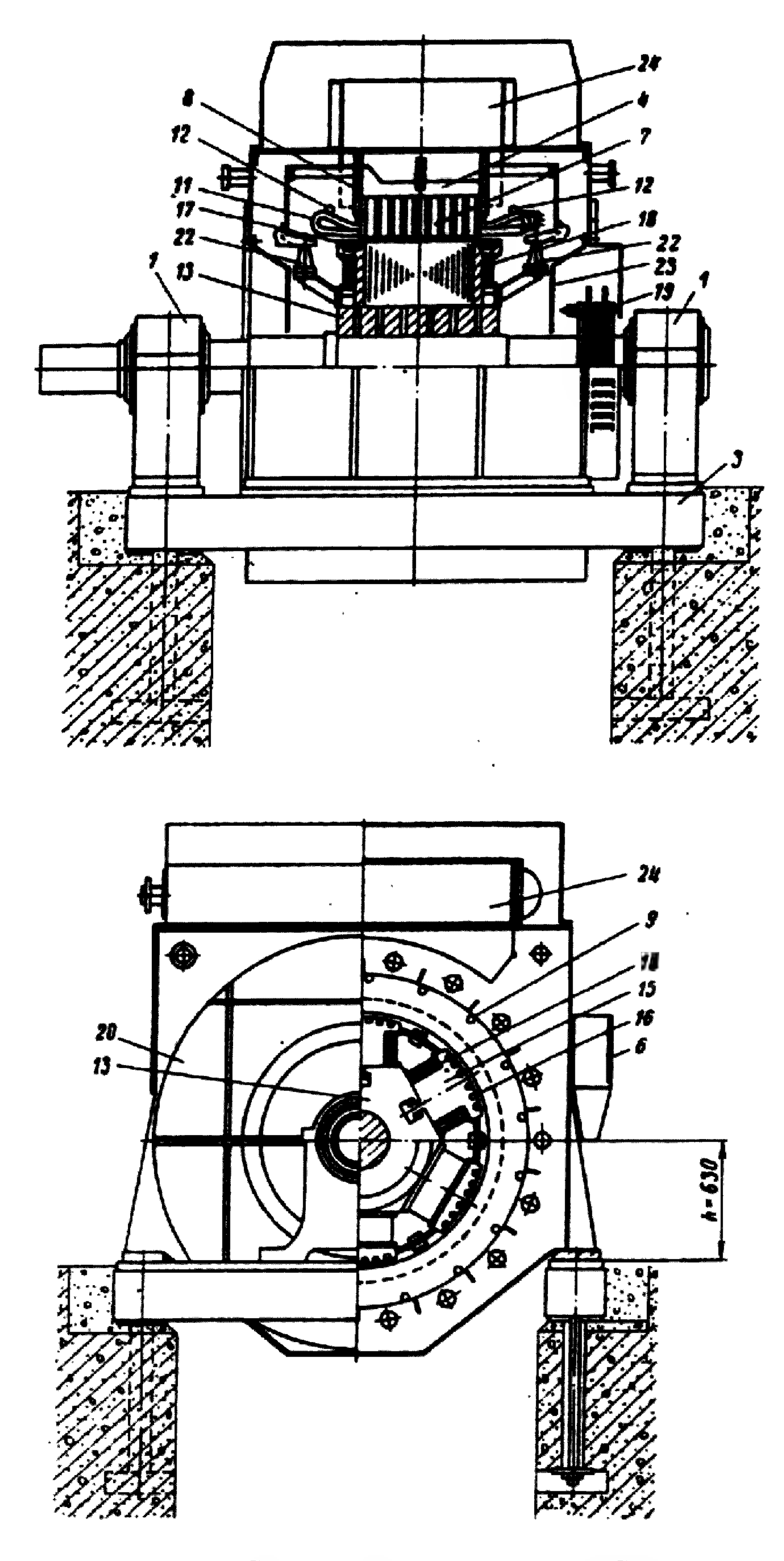
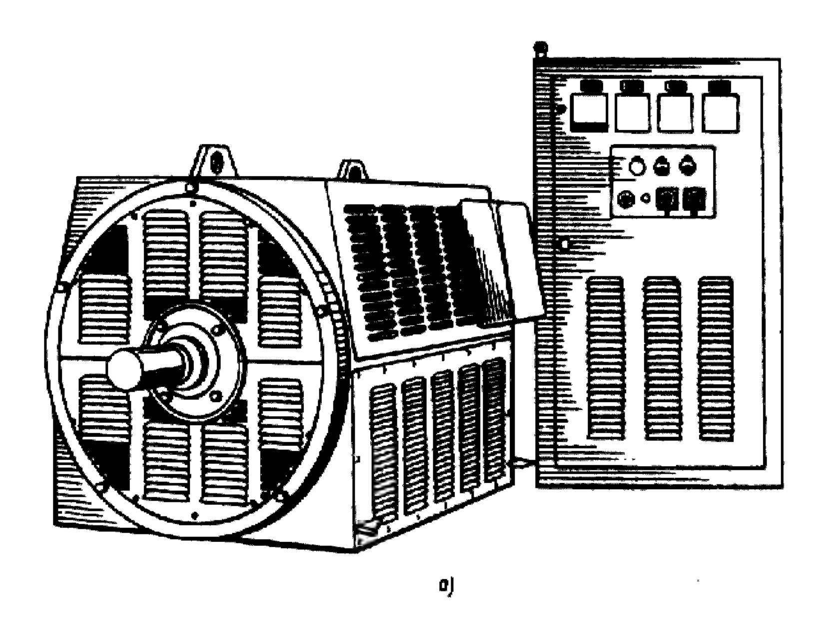


Рис. 10.3. Синхронный двигатель серии СДН3-2



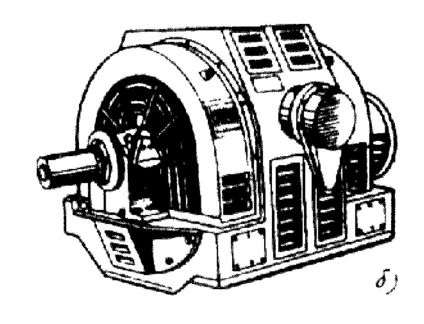


Рис. 10.4. Внешний вид синхронного двигателя:
а — СД2; *б* — СДН2

подшипники качения. Подшипники скольжения — стояковые с кольцевой смазкой. У применяемых подшипников сокращена осевая длина за счет отсутствия маслоуловительных козырьков. Для подшипников качения используют роликовые однорядные подшипники. В комплект подшипникового узла со стороны привода вместе с роликовым подшипником входит шариковый подшипник, который предназначен для восприятия случайных осевых нагрузок. Все машины серии СДН3-2 имеют подшипники скольжения.

Высота оси вращения для всех машин серий СДН2 и СДН3-2 равна 630 мм, а для машин серии СД2 (СГ2) — 450 мм у машин 13-го габарита и 500 мм у машин 14-го габарита.

Станины *4* всех машин сварные из листовой стали и состоят из стоек, соединенных между собой продольными ребрами жесткости, опорных лап и наружной обшивки. У машин серий СД2 и СДН2 в обшивке корпуса имеются окна *5* с жалюзи и решетками для выхода воздуха. У машин серии СДН3-2 обшивка корпуса глухая, в днище корпуса имеются окна для присоединения воздуховодов. На станине закрепляют коробку выводов статора с крышкой *6*. Сердечник статора *7* состоит из запрессованных в корпус станины пакетов, собранных из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Между пакетами имеются вентиляционные каналы.

В машинах серии СДН2 пакет собирают из целых листов, а у машин серий СДН2 и СДН3-2 — из сегментов. У машин серий СДН2 и СДН3-2 удержание магнитопровода в запрессованном состоянии обеспечивают нажимные кольца *8* и стяжные шпильки *9*, а у машин СД2 (СГ2) — нажимные шайбы *10*, соединенные между собой стяжками. Во всех машинах применена двухслойная петлевая обмотка *11*, которую укладывают в прямоугольные пазы статора. У машин серии СД2, а также у генераторов серий СГ2 и СГД2 в эти же пазы укладывают по одному проводнику дополнительной обмотки, предназначенной для питания возбудительного устройства. Пазовую часть обмотки крепят гетинаксовыми клиньями. Лобовые части обмотки в зависимости от вылета и глубины паза крепят изолированными бандажными кольцами *12*.

Роторы машин имеют два исполнения. У быстроходных машин полюсы сажают на остов, а у тихоходных — на магнитное колесо. Остов ротора *13* (см. рис. 10.3) выполняют шихтованным из листовой стали марки Ст3. У машин 13—17-го габаритов остов состоит из одного пакета, а у машин, начиная с 18-го габарита, подразделяется на несколько пакетов длиной 100 мм с промежутками между ними в 15…25 мм. Магнитное колесо *14* (см. рис. 10.2) выполняют сварным из листовой стали марки Ст3.

Полюсы быстроходных машин устанавливают на остов ротора Т-образными хвостовиками, а в некоторых машинах — хвостовиками в виде ласточкина хвоста. Полюсы тихоходных машин крепят к ободу магнитного колеса шпильками и гайками.

Сердечники полюсов *15* выполняют шихтованными из листовой стали марки Ст3 толщиной 1 и 1,4 мм. Запрессовку сердечника полюса осуществляют с помощью литых нажимных щек и заклепок. Сердечники полюсов бесхвостового исполнения имеют массивный центральный стержень, в который заворачивают крепящих полюс шпилек.

Демпферную (пусковую) клетку *16* выполняют из медных стержней, расположенных в полузакрытых пазах сердечников полюсов, припаянных к дугообразным сегментам *17* и выполненных из полосовой меди, гнутой плашмя. У некоторых двигателей часть пазов заполняют латунными стержнями. Соединение короткозамыкающих сегментов соседних полюсов быстроходных машин производят встык с помощью соединительных накладок с дополнительным креплением соединения шпилькой к остову ротора. Короткозамыкающие сегменты тихоходных машин соединяют между собой внахлест.

Обмотки возбуждения *18* состоят из катушек, изготовленных из полосовой меди, намотанной на ребро. Между витками прокладывают изоляцию из асбестовой бумаги.

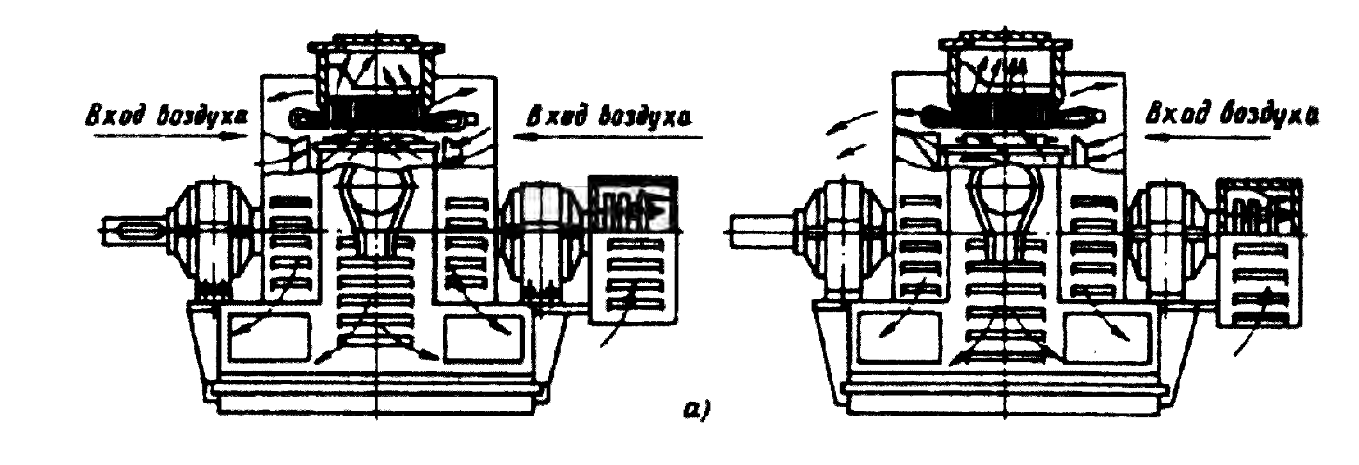
Контактные кольца *19* подвесного типа изготовляют из стали марки Ст3 или чугуна и крепят на конце вала за подшипниковым узлом у машин 13—17-го габаритов и между подшипниковыми стояками у машин, начиная с 18-го габарита (серия СДН3-2).

Подшипниковые щиты *20* у машин серии СД2 (СГ2) (см. рис. 10.1) сварные, которые центрируют замками в станине. В щитах имеются окна с жалюзи, через которые входит охлаждающий машину воздух. В серии СДН2 (см. рис. 10.2) нижние подшипниковые полущиты *2* в машинах 16-го габарита изготовляют литыми из чугуна, а у машин 17-го габарита приняты сварные полущиты. В полущитах предусматривают вентиляционные окна, служащие также для измерения воздушного зазора. Предохранительные щиты *21* прикрепляют к верхним торцевым частям станины, и их конструкция определяется необходимостью обеспечения заданной степени защиты машины.

При степени защиты IP11 вентиляционные окна, расположенные на цилиндрической поверхности щитов, закрыты жалюзи, окна на торцевых поверхностях — решетками, сварными из концентрически расположенных круглых прутков и радиальных ребер. Для предотвращения попадания внутрь двигателя воды, стекающей по торцевой поверхности щита, предусмотрены обтекатели. Щиты машин со степенью защиты IP43 отличаются от щитов машин исполнения IP11 только отсутствием вентиляционных окон.

В машинах серии СДН3-2 применяют плоские разъемные щиты *20* (см. рис. 10.3) из листовой стали толщиной 5 мм. Для увеличения жесткости щиты имеют горизонтальные и вертикальные ребра из полосовой стали.

Во всех сериях применяют воздушное охлаждение с самовентиляцией. В машинах серии СД2 принята согласная радиальная система вентиляции. В серии СДН2 применена согласная система вентиляции, причем при активной длине магнитопровода статора меньше 44 см используют аксиально-радиальную схему, а при длинах больше 44 см — радиальную. У закрытых машин серии СДН3-2 вентиляция происходит по замкнутому циклу через встроенный воздухоохладитель *24*, который у большинства машин размещают в верхней части корпуса. Схема вентиляции для машин серии выбирают в зависимости от окружной скорости ротора и длины статора. При окружных скоростях ротора более 40 м/с применяют согласную радиальную вентиляцию с осевым вентилятором, при скоростях от 20 до 35 м/с и активной длине статора машины до 40 см — согласную аксиально-радиальную систему с коническим вентилятором, при скоростях от 20 до 30 м/с, но при длине статора свыше 41 см — согласную радиальную с коническим вентилятором. Вентиляторы машин *22* (см. рис. 10.3) прикрепляют к ободу ротора. Для направления потока воздуха к подшипниковым щитам некоторых машин прикрепляют диффузоры *23*. На рис. 10.5, *а* в качестве примера показана схема согласной радиальной (левый рисунок) и согласной аксиально-радиальной вентиляции (правый рисунок) для защищенных машин, а на рис. 10.5, *б* — согласной радиальной вентиляции для закрытых машин.



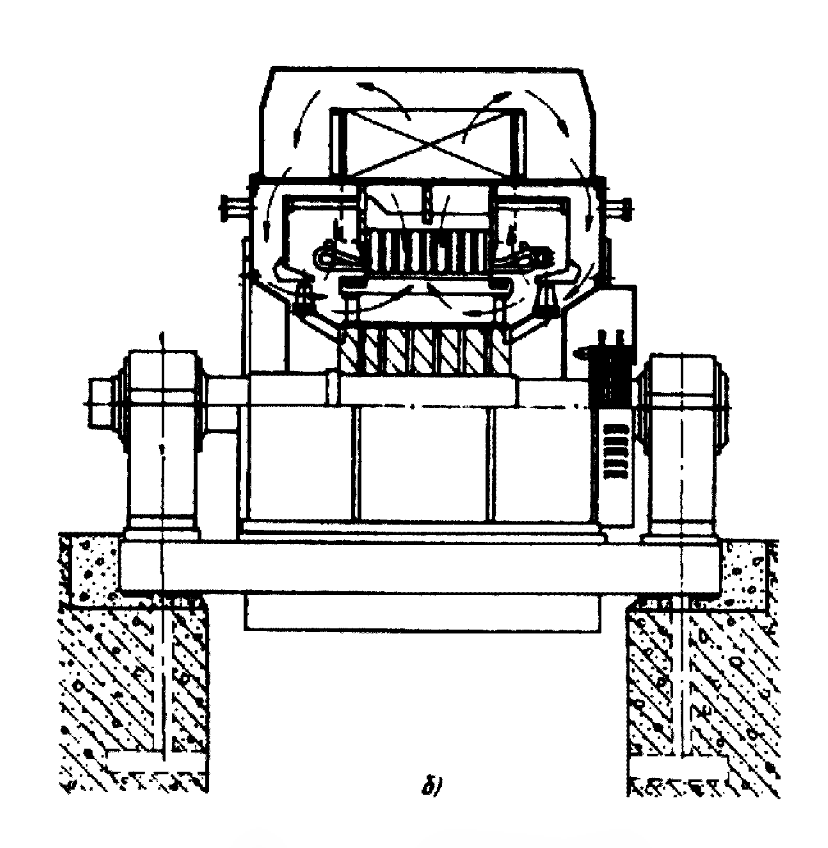
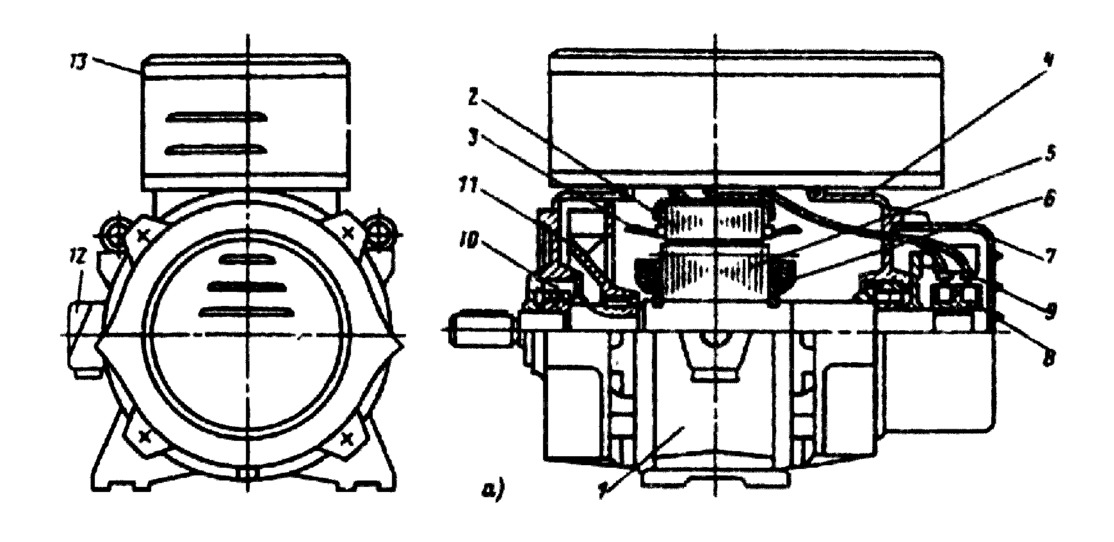


Рис. 10.5. Схемы вентиляции:
а — защищенных машин СДН2; *б* — закрытых машин СДН3-2

На рис. 10.6, *а* дана конструкция синхронного генератора серии ЕСС, а на рис. 10.6, *б* — его внешний вид. Генераторы изготовляют в горизонтальном защищенном исполнении. По способу крепления и конструкции подшипниковых узлов генераторы имеют две формы исполнения: IM1001 (на лапах с двумя одинаковыми подшипниковыми щитами) и IM2101 (на лапах с фланцевым подшипниковым щитом со стороны вала). Станина генератора *1* — чугунная, литая. В верхней ее части имеется проем прямоугольной формы, над которым устанавливают блок регулирования напряжения *13*. На внутренней поверхности станины равномерно по окружности расположены продольные ребра, на которые сажают обмотанный



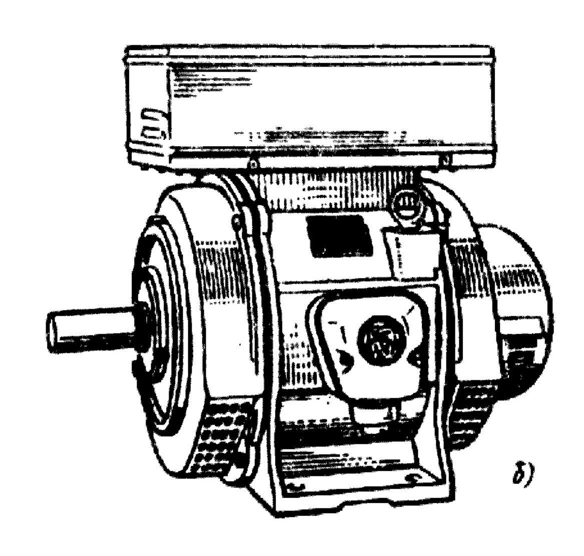


Рис. 10.6. Синхронный генератор серии ЕСС:
а — чертеж общего вида; *б* — внешний вид

магнитопровод статора. Каналы, образованные между ребрами и наружной поверхностью статорного магнитопровода, служат для прохождения охлаждающего воздуха. Вентиляция генератора — аксиальная, вытяжная. Воздух забирается центробежным вентилятором *11* через отверстия в щите, расположенном со стороны контактных колец. Подшипниковые щиты *4* — чугунные, литые. В нижних частях щитов расположены окна для прохождения воздуха. Окна защищены сетками, штампованными из листовой стали. Для увеличения размеров окон нижняя часть щитов расширена.

В подшипниковых щитах располагают подшипники *10*. Со стороны привода применяют роликоподшипники, а со стороны колец — шарикоподшипники. В генераторах 5-го габарита установлены шарикоподшипники с обеих сторон.

Магнитопровод статора *2* собирают из лакированных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Собранный в пакет магнитопровод после опрессовки удерживается шестью продольными скобками, которые на торцах приваривают к

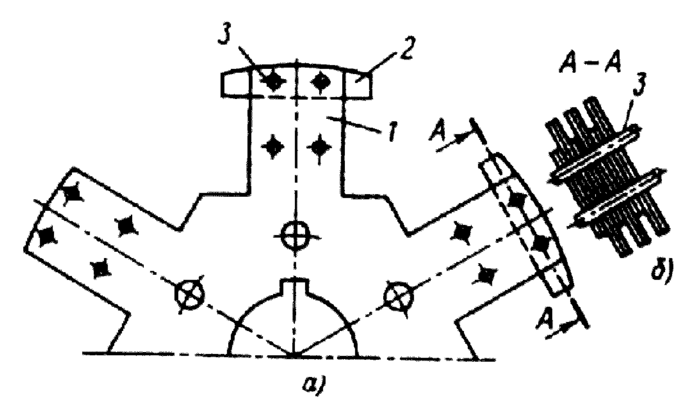


Рис. 10.7. Ротор синхронного генератора серии ЕСС

нажимным кольцам. Магнитопровод впрессовывают в станину и закрепляют от проворачивания винтом.

В полузакрытых пазах статора уложена всыпная петлевая двухслойная обмотка *3* из круглого медного провода марки ПСД. Изоляция обмотки и паза соответствует классу нагревостойкости В.

Сердечник ротора *5* собирают из листов электротехнической стали, которые имеют форму звезды с числом лучей (выступов) *1*, равным числу полюсов (рис. 10.7, *а*). Листы используют двух видов, отличающих друг от друга высотой выступов. Из той же стали, штампуют сегменты *2*, имеющие форму полюсных наконечников. По длине сердечник состоит из чередующих пакетов, состоящих из листов с короткими или длинными выступами. Крайние пакеты с короткими выступами собранны из листов тонколистовой стали толщиной 2 мм.

Собранный и спрессованный магнитопровод закрепляют на валу с помощью шпонки, а с торцов — двумя пружинными кольцами.

Катушки обмоток возбуждения *6* (см. рис. 10.6, *а*) наматывают из прямоугольной меди и после предварительной изоляции полюсных сердечников надевают на них. Сверху и снизу катушек устанавливают изолирующие шайбы. Под нижнюю шайбу подкладывают стальную пружинящую рамку, предохраняющую от перемещения катушки относительно сердечника. После установки катушек на полюсы зашихтовывают пакеты сегментов полюсных наконечников *2* (рис. 10.7, *б*). Сегменты с сердечниками крепят с помощью двух продольных шпилек *3*, проходящих через отверстия сегментов и высоких пакетов, при этом наружные размеры сегментов и высоких пакетов строго совпадают, образуя внешнюю поверхность ротора. Между сегментами по краю полюсов остаются воздушные промежутки, равные толщине высоких пакетов.

На выступающие из полюсов концы шпилек устанавливают силуминовые втулки, удерживающие торцевые части катушек от изгибания.

Выводные провода обмотки ротора пропускают через вал, конец которого со стороны колец полый (сверленый), и соединяют с контактными кольцами *8* (см. рис. 10.6, *а*), изготовленными из латуни. Кольца с контактными шпильками запрессовывают в изоляционном пресс-материале на стальную втулку, которая служит для посадки контактных колец на конец вала. Втулку на вал закрепляют от проворачивания призматической шпонкой, а от осевого смещения — установленным на валу пружинным кольцом. Кольца закрывают штампованным из

листовой стали кожухом *7*. На подшипниковом щите со стороны колец крепят чугунное кольцо, которое стягивает крышку подшипника. В кольцо ввинчивают одну или две шпильки, опрессованные в изоляционный пресс-материал. На шпильки крепят по две траверсы *9*, каждая из которых имеет два щеткодержателя со щетками марки ЭГ-14 размером $10 \times 12{,}5$ мм. Блок регулирования напряжения *13* устанавливают над проемом в станине. В нем устанавливают выпрямители цепи возбуждения, трансформаторы тока, дроссель цепи компаундирования и конденсаторы для самовозбуждения.

На станине располагают коробку выводов *12* для присоединения внешних проводов [16].

10.3. СИСТЕМА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

При анализе работы синхронных машин и при построении их характеристик широко используют систему относительных единиц. В этом случае напряжения, ЭДС, сопротивления, мощности и т. д. выражают не в физических единицах, а в величинах, являющихся их отношениями к соответствующему значению, которое принимают за базовое. Обычно для токов и напряжения статора за базовые значения принимают их номинальные фазные значения $I_{ном.ф}$ и $U_{ном.ф}$, а для мощности — полную номинальную мощность $S_{íîì} = mU_{íîì\,.ô}$, $I_{ном.ф}$. Сопротивления обмоток относят к базовому сопротивлению, равному отношению номинального фазного напряжения к номинальному фазному току. За базовый момент принимают отношение $M_б = S_{ном} / \Omega_{ном}$ ($\Omega_{ном}$ — угловая синхронная скорость).

Для того чтобы выразить в относительных единицах величины и параметры роторных контуров, их нужно предварительно привести к числу витков обмотки статора, а затем разделить на соответствующее указанное выше базовое значение этой величины.

В обозначении величин, выраженных в относительных единицах, в нижнем индексе указывается звездочка. Так, ток в относительных единицах будет обозначаться I_*, индуктивное сопротивление x_* и т. д.

Применение относительных единиц делает анализ работы машины более наглядным и обобщенным [6].

10.4. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ

При разработке электрической машины задаются рядом исходных величин, которые будут являться номинальными данными спроектированной машины. Для синхронной машины такими данными являются следующие.

1. Номинальная мощность. Для двигателей этой мощностью является механическая мощность на валу $P_{ном}$ в киловаттах. Иногда еще задается полная мощность $S_{ном}$ в киловольт-амперах. Для генераторов за номинальную мощность принимается электрическая отдаваемая мощность $S_{ном}$ в киловольт-амперах, а также ее активная составляющая $P_{ном}$ в киловаттах.

2. Номинальное линейное напряжение $U_{ном}$, В или кВ.

3. Число фаз и схема соединения обмотки статора (звезда или треугольник). Чаще всего применяется схема соединения звезда.

4. Номинальная частота вращения $n_{ном}$, об/мин.

5. Частота f, Гц.

6. Коэффициент мощности $\cos\varphi$. Обычно $\cos\varphi = 0{,}9$ при опережающем токе для двигателей и 0,8 при отстающем для генераторов.

Кроме того, в некоторых случаях могут быть заданы некоторые дополнительные данные: момент инерции J, система вентиляции, пусковые условия, конструктивный тип и т. д.

Серии общепромышленных синхронных машин выпускают чаще в защищенном исполнении с горизонтальным расположением вала. Поэтому в приведенной ниже методике расчета будут рассматриваться машины такого типа.

10.5. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

Проектирование синхронных машин, как, впрочем, и любой другой электрической машины, начинают с выбора главных размеров: внутреннего диаметра статора D и расчетной длины l_δ. Задача эта не имеет однозначного решения, так как при выборе главных размеров приходится учитывать ряд требований. Поэтому для нахождения оптимальных значений D и l_δ приходится в некоторых случаях просчитывать ряд вариантов. Для сокращения числа рассчитываемых вариантов целесообразно воспользоваться рекомендациями, полученными на основе накопленного опыта проектирования и эксплуатации подобных машин. Для предварительного определения диаметра можно воспользоваться построенными в логарифмическом масштабе зависимостями $D = f(S')$ (рис. 10.8), которые соответствуют усредненным диаметрам выполненных машин.

Расчетную электромагнитную мощность $S'_{ном}$ определяют по формулам:

$$\text{для двигателя } S'_{ном} = k_E P_{ном} / (\eta \cos\varphi); \qquad (10.1)$$

$$\text{для генераторов } S'_{ном} = k_E P_{ном} / \cos\varphi .$$

Коэффициент k_E представляет собой отношение ЭДС в якоре при номинальной нагрузке к номинальному напряжению. Он зависит от $\cos\varphi$ сопротивления обмотки статора.

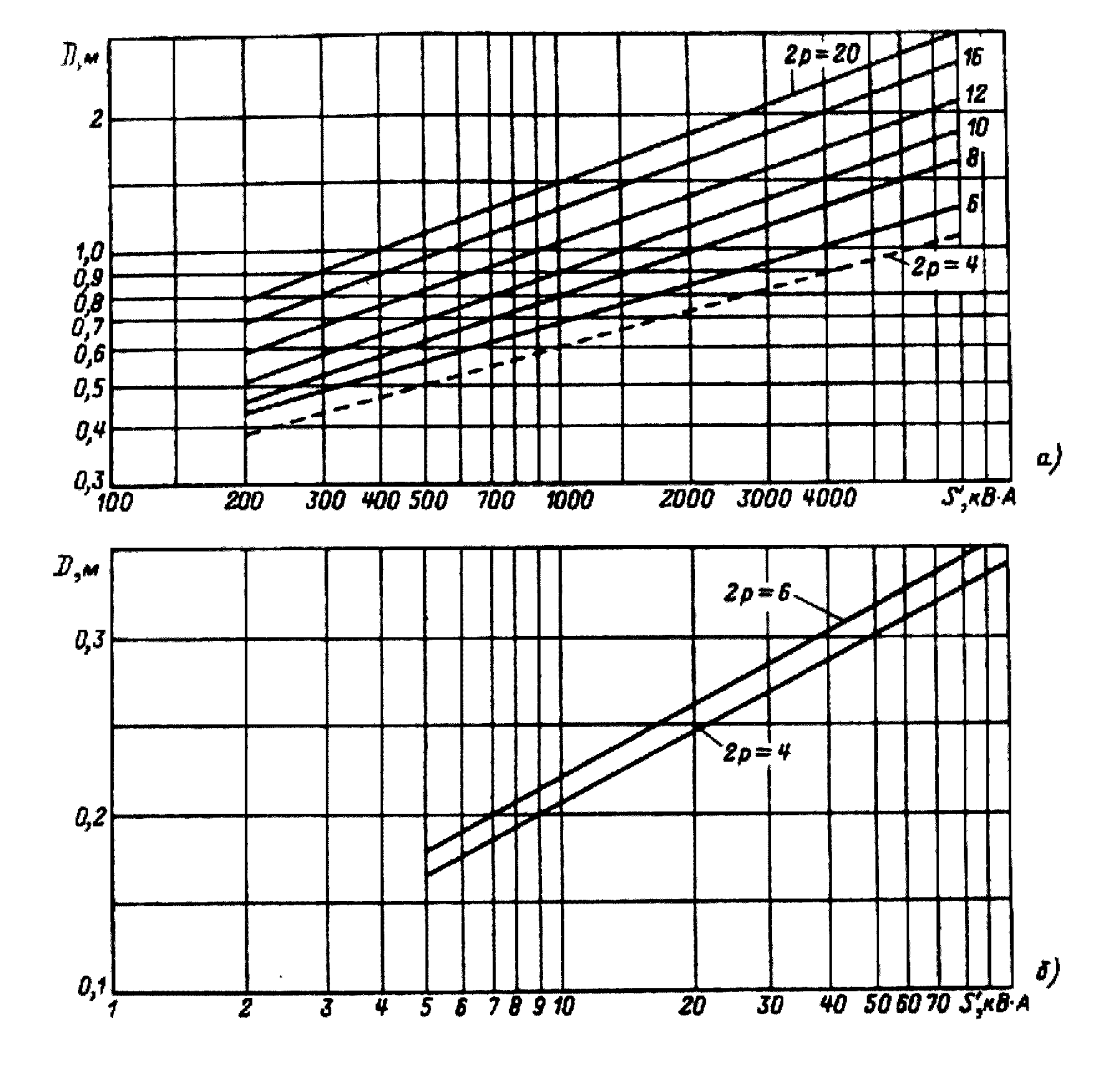


Рис. 10.8. Зависимость $D = f(S')$ при различных числах полюсов:
а при $S' > 100$ кВА; *б* — при $S' \leq 100$ кВА

При работе синхронного двигателя с опережающим током и $\cos\varphi = 0{,}9$ можно принять $k_E \approx 1{,}05...1{,}06$; для генераторов, работающих с отстающим током и $\cos\varphi = 0{,}8$, принимают $k_E \approx 1{,}08$.

Коэффициент полезного действия для двигателей предварительно можно взять из табл. 10.3, где даны значения КПД для серийно выпускаемых синхронных двигателей при номинальном напряжении $U_{ном} = 6000$ В . При $U_{ном} = 380$ В КПД двигателей увеличивается на 0,3…1%, а при $U_{ном} = 10000$ В снижается на 0,05…0,2 % . Коэффициенты полезного действия выпускаемых в настоящее время синхронных генераторов при $\cos\varphi = 0{,}8$ и $U_{ном} = 400$ В даны в табл. 10.4.

При других значениях мощности, частоты вращения и напряжения предварительное значение КПД генераторов при $\cos\varphi = 0{,}8$ можно получить по табл. 10.3 (с учетом поправки по напряжению), снизив найденное значение на 0,2…0,7%. В табл. 10.5 даны КПД для генераторов мощностью до 100 кВт.

Таблица 10.3. **Значения КПД синхронных двигателей, %, при** $\cos\varphi$ **= 0,9 и** $U_{ном}$ **= 6000 В**

$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин							
	1500	1000	750	600	500	375	300	250
315	—	94,2	93,9	93,4	—	91,25	91,27	90,8
400		94,6	94	93,9	92,9	91,6	91,94	92
500	—	94,7	94,4	94,3	93,7	92,65	93	93
630	95	95,1	94,9	94,6	94,28	93,4	93,34	93,5
800	95,5	95,6	94,95	95,17	94,42	94,2	93,9	93,9
1000	95,5	95,63	95,5	95,5	95	95	94,4	94,45
1250	—	95,9	95,8	95,54	95,45	95,3	94,66	94,66
1600	—	96,3	96	96	95,85	95,77	95,2	95
2000	—	96,8	96,3	96,3	96,2	95,78	95,7	95,4
2500	—	96,8	96,7	96,6	96,5	96,26	95,72	95,65
3200	—	97	96,8	96,88	96,6	96,69	96,1	96
4000	—	97,2	97	96,83	96,76	96,54	96,3	96,28
5000	—	97,3	97,2	97,09	97,07	—	—	—

Таблица 10.4. **Значения КПД синхронных генераторов, %, при** $\cos\varphi$**=0,8 и** $U_{ном}$ **= 400 В**

$P_{ном}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин			
	1000	600	500	375
125	—	—	90,5	—
160	—	91,3	—	—
200	—	—	91,9	—
250	93	92,6	—	—
315	—	—	92,7	—
400	—	—	—	92,6
500	—	—	—	93,4
630	—	—	—	93,8
800	—	—	—	94,1

Таблица 10.5. **Значения КПД синхронных генераторов, %,** $\cos\varphi$ **= 0,8,** $U_{ном}$ **= 230 и 400 В и** $n_{ном}$ **= 1500 об/мин**

$P_{ном}$, кВт	4	8	12	16	20	30	50	60	75	100
η, %	80	82,2	86	87	87,5	88	90	90,5	91	92,5

По найденному диаметру определяют полюсное деление:

$$\tau - \pi D/(2p), \tag{10.2}$$

где $p = 60f / n_{ном}$.

Предварительное значение внешнего диаметра статора D_a находят по формуле

$$D_a = K_D D. \tag{10.3}$$

Коэффициент K_D в зависимости от числа полюсов машины имеет значения, приведенные в табл. 10.6.

Таблица 10.6. **Значение K_D в зависимости от числа полюсов**

$2p$	4	6	8	10	12	16
K_D	1,43—1,52	1,4—1,45	1,35—1,4	1,3—1,35	1,28—1,33	1,22—1,28

Полученное значение D_a следует округлить до ближайшего нормализованного диаметра. Значения их даны в табл. 10.7. Нормализованные диаметры получены исходя из наиболее благоприятного раскроя листов электротехнической стали, при котором уменьшаются отходы при штамповке. Нормализованным диаметром определяется габарит машины.

Таблица 10.7. **Высота оси вращения и диаметр статора**

Габарит	Диаметр, мм	Высота оси вращения, мм
5	280	180
6	327	200
7	393	225
8	423	250
9	493	280
10	520	315
11	590	355
12	660	400
13	740	450
14	850	500
15	990	560
16	1180	630
17	1430	630
18	1730	630
19	2150	630
20	2600	630
21	3250	630

От выбранного внешнего диаметра магнитопровода статора D_a зависит высота оси вращения h у проектируемой машины. Высоты осей вращения в зависимости от D_a для выпускаемых в настоящее время синхронных машин даны в табл. 10.7. Машины, выполненные на диаметрах D_a от 1180 мм и выше, имеют высоту оси вращения $h = 630$ мм, что достигается соответствующей приваркой лап к станине (см. рис. 10.3).

Если в результате округления отношение D_a / D будет выходить за пределы значений коэффициента K_D, то следует произвести пересчет внутреннего диаметра D и полюсного деления τ:

$$D = D_a / K_D; \qquad \tau = \pi D/(2p). \tag{10.4}$$

В этом случае для K_D можно взять среднее значение при данном числе полюсов.

По полученному диаметру D находят расчетную длину машины, м:

$$l_\delta = \frac{6{,}1 S'_{ном}}{a_\delta k_B k_{об1} A B_{\delta ном} D^2 n_{ном}}, \tag{10.5}$$

где a_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия (см. рис. 10.21); k_B — коэффициент формы поля (см. рис. 10.21); $k_{об1}$ — обмоточный коэффициент обмотки статора; A — линейная нагрузка статора, А/м; $B_{\delta ном}$ — максимальное значение индукции в воздушном зазоре при номинальной нагрузке, Тл; D — внутренний диаметр статора, м.

Как a_δ, так и k_B зависят от размеров и конфигурации полюсного наконечника, а также воздушного зазора и полюсного деления. Поскольку на данной стадии расчета эти значения неизвестны, то предварительно можно принять a_δ= 0,65…0,68, k_B = 1,16…1,41, а их произведение $a_\delta k_B$ = 0,75…0,78 (эти значения соответствуют a = 0,68…0,72, δ_m / δ = 1,5 и δ / τ = 0,01). При равномерном воздушном зазоре над полюсным наконечником в машинах небольшой мощности (менее 100 кВт) δ_m / δ = 1, и можно принять $a_\delta k_B$ = 0,84…0,87.

Обмоточный коэффициент $k_{об1}$ определяют по шагу обмотки статора и числу пазов на полюс и фазу. Предварительно $k_{об1}$ можно взять равным 0,92, что примерно соответствует шагу обмотки y = 0,83.

Линейную нагрузку A и индукцию $B_{\delta ном}$ для машин мощностью от 100…150 кВт и выше выбирают по кривым рис. 10.9, где приведенные зависимости получены для серийно выпускаемых синхронных машин с номинальным напряжением 6000…6600 В . Эти же зависимости соответствуют машинам и при номинальном напряжении 380…400 В. При номинальном напряжении 10000 В индукцию $B_{\delta ном}$ можно так же выбирать по кривым рис. 10.9, а линейную нагрузку целесообразно снизить на 10…15%, так как из-за более толстой пазовой изоляции ухудшается охлаждение проводников обмотки якоря.

Значения индукции $B_{\delta ном}$ и линейной нагрузки A для машин мощностью менее 100 кВт выбирают по рис 10.10.

Найденные из рис. 10.9 или 10.10 значения A и $B_{\delta ном}$ следует рассматривать как предварительные. В дальнейшем расчете при необходимости их можно изменить.

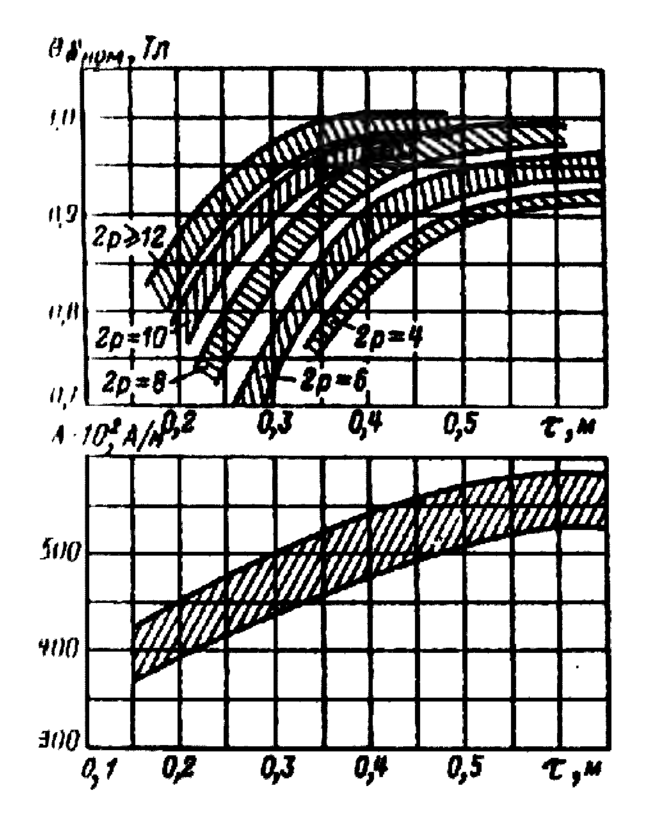


Рис. 10.9. Зависимость $B_{\delta ном}$ и A от τ для синхронных машин мощностью более 100 кВт

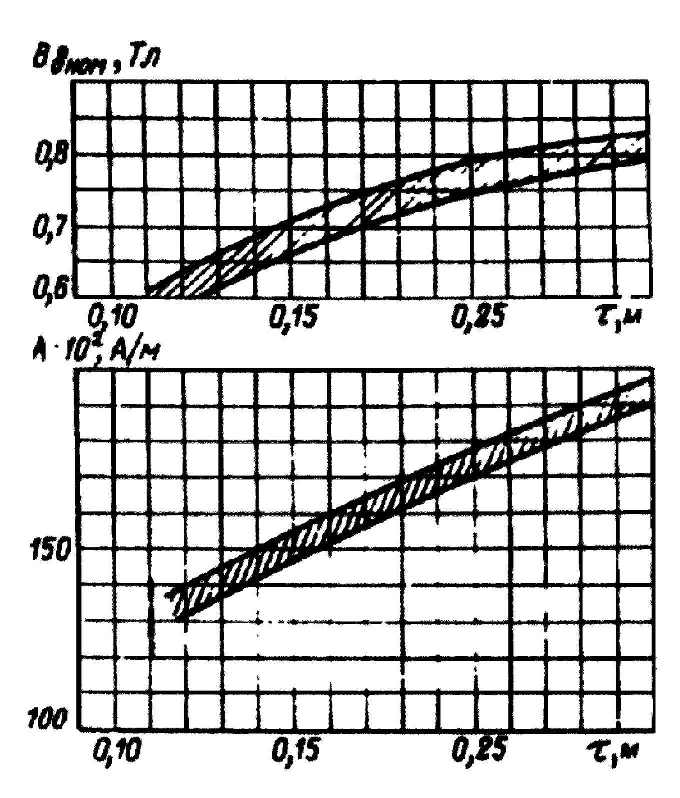


Рис. 10.10. Зависимость $B_{\delta ном}$ и A от τ для синхронных машин мощностью менее 100 кВт

Найденные из рис. 10.9 или 10.10 значения A и $B_{\delta ном}$ следует рассматривать как предварительные. В дальнейшем расчете при необходимости их можно изменить. При этом следует иметь в виду, что в зависимости от выбора A и $B_{\delta ном}$ изменяется активный объем $D^2 l_\delta$ проектируемой машины. Чем больше произведение $AB_{\delta ном}$, тем меньший объем будет иметь машина. Однако как A, так и $B_{\delta ном}$ имеют свои верхние пределы.

Основным фактором, ограничивающим линейную нагрузку, является нагрев обмотки, так как с возрастанием A в ней увеличиваются электрические потери. Допустимое значение линейной нагрузки зависит от класса нагревостойкости применяемой изоляции, а также от конструктивного выполнения машины и, прежде всего, от способов ее охлаждения. Приведенные на рис. 10.9 и 10.10 значения A получены по данным выпускаемых в настоящее время синхронных машин защищенного исполнения с косвенным воздушным охлаждением, имеющих изоляцию класса нагревостойкости B. При применении изоляции класса нагревостойкости F линейную нагрузку следует увеличить в 1,12 раза, а при применении изоляции класса нагревостойкости H — в 1,2 раза.

Верхний предел индукции $B_{\delta ном}$ ограничен главным образом насыщением магнитной цепи и, в первую очередь насыщением зубцового слоя. С повышением насыщения увеличивается мощность, необходимая для возбуждения машины, вследствие чего возрастают размеры обмотки возбуждения и высоты полюса.

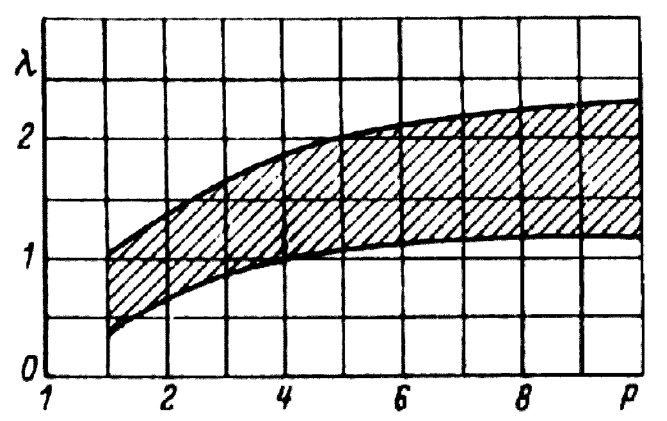


Рис. 10.11. Значение $\lambda = l_\delta / r$ в зависимости от числа пар полюсов

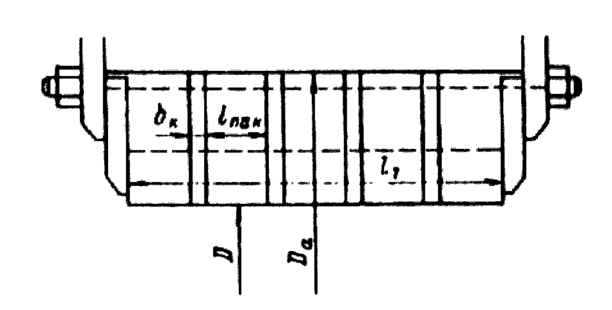


Рис. 10.12. Размеры активной стали статора

Следует также отметить, что от отношения $A/B_{\delta ном}$ зависят индуктивные сопротивления обмотки. С увеличением этого отношения индуктивные сопротивления возрастают.

Определив расчетную длину машины l_δ, находят отношение

$$\lambda = l_\delta / \tau . \qquad (10.6)$$

От λ зависят ряд показателей машины и условия ее охлаждения. Чем длиннее машина (больше λ), тем хуже условия ее охлаждения. Значение λ для выпускаемых в настоящее время синхронных машин обычно лежит в пределах, указанных на рис. 10.11. Если λ не укладывается в указанные пределы, то следует изменить диаметр D, а если потребуется, то и внешний диаметр D_a. При изменении диаметра D в соответствии с (10.5) изменится и l_δ.

У машин небольшой мощности при l_δ меньше 250…300 мм, а у более крупных машин меньше 200 мм магнитопровод статора выполняется из одного пакета.

При большей длине в целях улучшения охлаждения сталь статора разбивают на несколько пакетов, между которыми делают радиальные вентиляционные каналы (рис. 10.12). Обычно длину пакетов $l_{пак}$ выбирают равной 4—5 см, а ширину канала $b_к$ = 1 см. При наличии вентиляционных каналов истинная длина статора будет больше расчетной и может быть найдена по формуле

$$l_1 \approx (1{,}05...1{,}08) l_\delta . \qquad (10.7)$$

Длину всех пакетов чаще всего берут одинаковой. Число вентиляционных каналов в этом случае будет равно:

$$n_{пак} = (l_1 - l_{пак}) / (l_{пак} + b_к) , \qquad (10.8)$$

причем $n_к$ округляют до целого числа.

Определив число каналов, уточняют длину пакета:

$$l_{пак} = (l_1 - n_к b_к) / (n_к + 1) . \qquad (10.9)$$

Суммарная длина пакетов сердечника

$$l_{ст1} = l_{пак}(n_к + 1). \qquad (10.10)$$

В некоторых случаях, главным образом для машин, имеющих большую длину, крайние пакеты изготовляют более длинными, чем средние.

10.6. ОБМОТКА И ЗУБЦОВАЯ ЗОНА СТАТОРА

Для статоров синхронных машин находят применение петлевые обмотки, состоящие из многовитковых катушек, и волновые обмотки числом эффективных проводников в пазу не более двух. Применение волновых обмоток имеет определенные преимущества при токах в параллельной ветви более 1000 А, поэтому они целесообразны для очень крупных машин (гидрогенераторы, турбогенераторы).

Для статоров синхронных машин общего назначения находят применение двухслойные катушечные петлевые обмотки с числом эффективных проводников в пазу $u_п$ более двух (см. гл. 3). По условиям технологии каждый эффективный проводник в зависимости от его сечения составляется из нескольких элементарных прямоугольных проводников с поперечным сечением 12…20 мм^2. Ток в таком составном проводнике допускается до 150…200 А . Если номинальный фазный ток машины $I_{ном.ф}$ превышает указанные пределы, то обмотку выполняют из нескольких параллельных ветвей.

Номинальный фазный ток $I_{ном.ф}$ обмотки статора при соединении ее в звезду равен линейному току $I_{ном}$, а при соединении в треугольник будет в $\sqrt{3}$ раз меньше: $I_{ном.ф} = I_{ном}\sqrt{3}$.

Номинальный линейный ток $I_{ном}$ машины определяют исходя из заданных номинальных значений мощности и напряжения:

для генератора

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном}\cos\varphi};$$

для двигателя (10.11)

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном}\eta\cos\varphi}.$$

При выборе числа параллельных ветвей следует исходить из того, чтобы ток в параллельной ветви находился в пределах от 50 до 150 А или в крайнем случае до 200 А:

$$a = I_{ном.ф}/[50...150(200)]. \qquad (10.12)$$

В этом диапазоне намечают возможное число параллельных ветвей (a — целое число), имея виду, что a должно быть кратно числу полюсов. В дальнейшем число параллельных ветвей необходимо увязать с выбранным числом пазов.

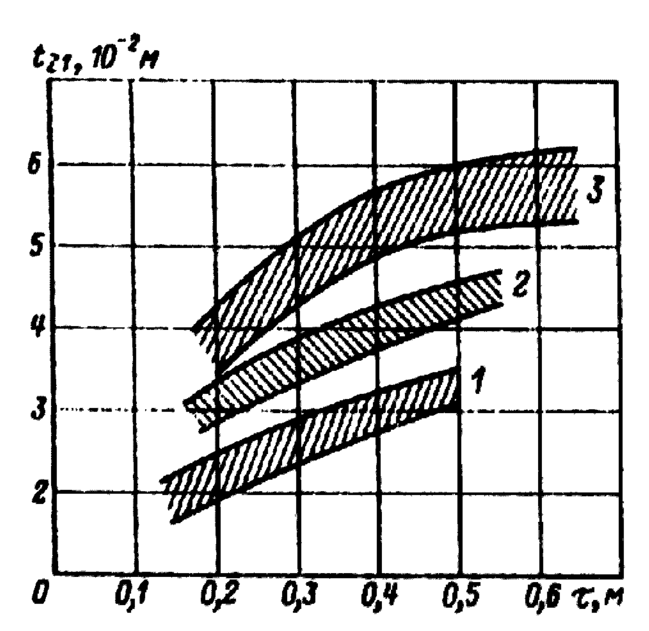


Рис. 10.13. Пределы изменения зубцового деления t_{Z1} в зависимости от полюсного деления τ для синхронных машин:
1 13 и 14-го габаритов; *2* — 16 и 17-го габаритов;
3 — 18—21-го габаритов

При выборе числа пазов следует учитывать ряд обстоятельств, влияющих на технико-экономические показатели машины. При большом числе пазов увеличивается расход дорогостоящей пазовой изоляции, уменьшается механическая прочность зубцов, но улучшается форма кривых ЭДС и МДС обмотки статора.

При уменьшении числа пазов возрастает объем тока в пазу и перепад температуры в изоляции, увеличиваются добавочные потери в меди, а так же пульсационные и поверхностные потери. Кроме того, с увеличением размеров катушки усложняются ее изготовление и укладка в пазы. При разработке серии в целях унификации обмоточных проводов и числа применяемых штампов стремятся выбирать одинаковые пазы для машин с различным числом полюсов.

Оптимальный выбор числа пазов Z_1 может быть сделан путем расчета и сопоставления между собой ряда вариантов. Задача упрощается, если воспользоваться опытом разработки подобных машин, при этом можно исходить из зубцового деления:

$$t_{Z1} = \pi D / Z_1 . \quad (10.13)$$

На рис. 10.13 показаны пределы изменения t_{Z1} в зависимости от полюсного деления для выпускаемых в настоящее время машин общепромышленного применения мощностью свыше 100 кВт. Определив при данном значении максимальное и минимальное значения t_{Z1}, находят числа пазов (зубцов) машины:

$$Z_{1\max} = \pi D / t_{Z1\min} ;$$
$$Z_{1\min} = \pi D / t_{Z1\max} . \quad (10.14)$$

Из этого диапазона выбирают такие числа пазов (Z_1 — целое число), при которых выполняются следующие требования.

1. Z_1 должно быть кратным числу фаз m и числу параллельных ветвей a, т. е. Z_1 / ma — целое число.

2. Число пазов на полюс и фазу $q_1 = Z_1 / 2pm$ должно быть целым или дробным вида $q_1 = b + c/d$ (b — целое число, а c/d — правильная несократимая дробь), причем d не может быть кратно числу фаз m и должно быть меньше числа пар полюсов.

Для синхронных машин при $2p<8$ чаще всего выбирают целое число пазов на полюс и фазу $[q_1 = 3(2)...5]$ (большие значения для машин с меньшим числом полюсов). При числе полюсов $2p>8$ и малом полюсном делении можно выбирать обмотки с дробным $q_1 (1\frac{1}{2} < q_1 < 3)$.

3. Число параллельных ветви и число полюсов должны быть связаны следующими соотношениями:

а) при целом числе пазов на полюс и фазу $2p/a$ — целое число;

б) при дробном числе пазов на полюс и фазу $2p/ad$ — целое число.

4. Для удобства сегментировки статора желательно, чтобы число пазов разлагалось на возможно большее число простых множителей (2, 3, 5).

5. Число пазов должно быть кратным числу разъемов статора.

Четвертое требование следует выполнять для машин, имеющих внешний диаметр статора $D_a > 990$ мм, а пятое — для машин $D_a > 3250$ мм. Из найденного выше диапазона чисел пазов выбирают такие Z_1, при которых наиболее полно удовлетворяются указанные требования. Затем определяют число эффективных проводников в пазу u_n и зубцовое деление t_{Z1}:

$$u_n = \frac{\pi a D A}{Z_1 I_{ном.ф}}, \quad (10.15)$$

значение u_n округляют до ближайшего четного числа.

По найденному значению u_n уточняют линейную нагрузку:

$$A = \frac{Z_1 u_n I_{ном.ф}}{\pi a D}. \quad (10.16)$$

Наилучшим вариантом числа пазов следует признать такой, при котором уточненное значение линейной нагрузки незначительно отличается от выбранной в начале расчета (± 5 %) и зубцовое деление имеет приемлемое значение. Полученные таким образом значения Z_1, u_n, a, q и A для машин с $D_a < 990$ мм являются окончательными и должны использоваться в дальнейших расчетах.

Для машин, имеющих $D_a > 990$ мм, число пазов устанавливают после выбора сегментировки статора (см. § 10.7).

У синхронных машин мощностью менее 100 кВт при $U_{ном} < 500$ В для статора чаще всего применяют полузакрытые пазы и всыпные петлевые обмотки из круглых проводников. Пазы имеют трапецеидальную или грушевидную форму. Число пазов на полюс и фазу q_1 берут, целым и выбирают в пределах от 2 до 5. Большее значение q_1 принимают для машин с меньшим число полюсов.

Задавшись числом q_1, определяют общее число зубцов статора:

$$Z_1 = 2 p q_1 m. \quad (10.17)$$

Тогда зубцовое деление статора

$$t_{Z1} = \pi D / Z_1 . \qquad (10.18)$$

Зубцовое деление для этих машин составляет 1,5…2,5 см. Число эффективных проводников в пазу статора

$$u_п = t_{Z1} Aa / I_{ном.ф} .$$

(10.19)

При двухслойной обмотке статора $u_п$ должно быть четным. При округлении $u_п$ следует контролировать изменение линейной нагрузки A. При значительном ее отклонении от ранее выбранной (более ± 5 %) может потребоваться изменение t_{Z1}. При этом выбирают другое значение q_1 или число параллельных ветвей.

10.7. СЕГМЕНТИРОВКА СТАТОРА

Листы электротехнической стали выпускаются с максимальной шириной 1000 мм. Поэтому когда $D_a > 990$ мм, то магнитопровод статора собирается из отдельных сегментов (рис. 10.14).

Хорда H сегмента (рис. 10.15) с необходимым припуском на штамповку (5…10 мм) должна быть возможно ближе к ширине одного из стандартных листов электротехнической стали, имеющих размеры 600×1500, 750×1500, 860×1720, 1000×2000 мм.

Если принять, что число сегментов в полной окружности статора равно s_{CT}, то можно определить длину хорды H:

$$H = D_a \sin(180^0 / s_{CT}) . \qquad (10.20)$$

Хорда также может быть выбрана равной примерно половине ширины листа, но не менее 370 мм. Число сегментов в слое может быть целым или дробным. Предпочтительным является целое число сегментов. Для большинства выпускаемых в настоящее время средних и крупных синхронных машин общего назначения число сегментов равно целому числу и выбрано в пределах от 6 до 18. Однако встречаются отдельные машины, у которых s_{CT} равно целому числу плюс 1/5, или 2/5, или 1/2, или 1/3. На рис. 10.14 показан сегмент с 15 пазами: его дуга соответствует 50^0. Следовательно, здесь $S_{CT} = 7\,\frac{1}{5}$ и в одном слое будет укладываться семь

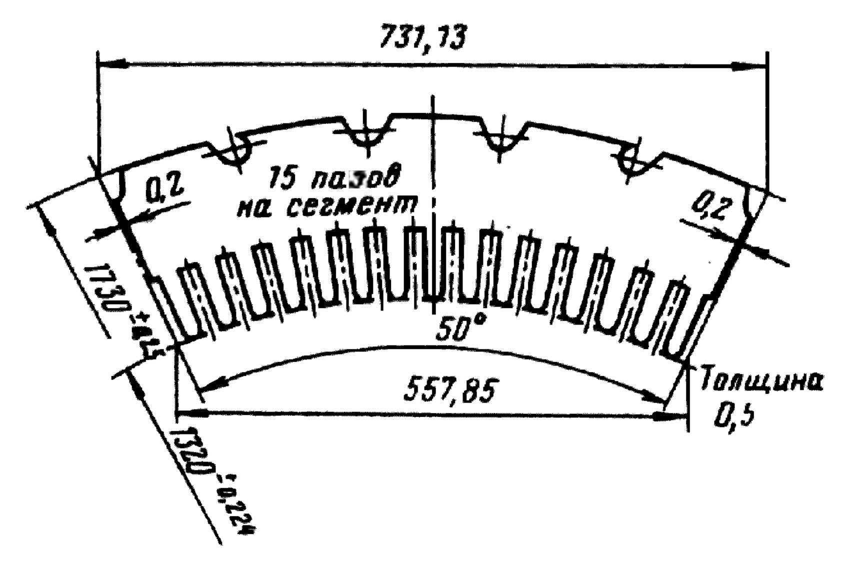


Рис. 10.14. Сегмент стали статора

сегментов, а 4/5 восьмого перейдет в следующий слой и т. д. Каждый сегмент должен иметь целое число пазовых делений, а стыки между соседними сегментами должны проходить через середину паза. Для того чтобы избежать накладывания краев сегментов друг на друга, между сегментами одного слоя предусматривается промежуток в 0,4…0,6 мм. Число пазов в сегменте берется от 8 до 20. При четном числе пазовых делений в сегменте каждый следующий их слой сдвигается на 1/2 сегмента, а при нечетном числе — на 1/3 сегмента, для чего число пазовых делений должно быть кратно трем. Если число сегментов в слое дробное, то число пазов в сегменте должно быть кратным знаменателю дроби.

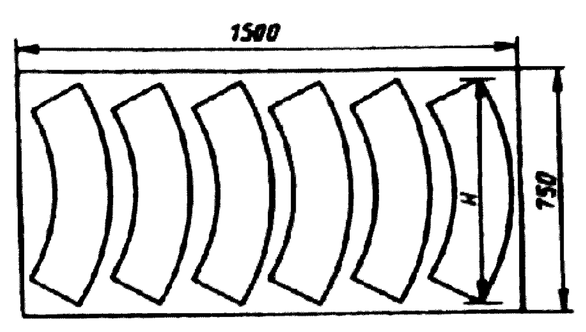


Рис. 10.15. Раскрой стандартного листа электротехнической стали

Сегменты сердечника статора крепят к корпусу на двух, трех, а иногда и большем числе клиньев или шпилек. Для этого на внешней дуге сегмента предусматривают пазы соответствующей формы, расположенные обычно симметрично относительно середины сегмента. При круглых пазах крайние отверстия делают скошенными (см. рис. 10.14). Как правило, синхронные машины общего назначения имеют внешний диаметр меньше 3250 мм. Поэтому подразделение статора на части, вызванное возможностью его транспортировки по железной дороге, у них не производится.

При проектировании статора стремятся к подбору такого числа пазов статора Z_1, при котором на один сегмент приходилось бы соответствующее целое их число, а сегменты обеспечивали хороший раскрой листов стали. Задача эта может решаться двояко.

1. При данном Z_1 находят возможные варианты чисел сегментов и их хорд. Число сегментов должно быть кратно числу пазов, и для их определения целесообразно использовать разложение Z_1 на множители.

2. Задаются рядом размеров хорды H и приближенно находят число сегментов:

$$s_{CT} = \pi D / H.$$

Хорда H должна быть равна или быть несколько меньше следующих значений: 370, 420, 490, 590 740, 850 мм. Затем, округляя s_{CT} до целого или соответствующего дробного числа, добиваются, чтобы число зубцов Z_s в хорде было равно целому числу $Z_s = Z_1 / s_{CT}$, после чего уточняют длину хорды H по (10.20). Такие расчеты целесообразно проделать для нескольких выбранных ранее значений Z_1. Для удобства сопоставления результаты расчетов следует свести в таблицу табл. 10.8.

Таблица 10.8. **Результаты расчетов**

Номер варианта	Число пазов Z_1	Число сегментов s_{cT}	Хорда сегмента H	Число пазов в сегменте Z_s	Число пазов на полюс и фазу q_1	Число параллельных ветвей a	Число эффективных проводников в пазу u_n	Зубцовое (пазовое) деление t_{Z1}	Линейная нагрузка A
1									
2									

В результате расчета определяют варианты, удовлетворяющие изложенным требованиям к сегментировке, из числа которых выбирают наиболее оптимальный.

Если ни при одном значении Z_1 удовлетворительной сегментировки не получается, то следует выбрать новые значения Z_1 за счет небольшого изменения пределов зубцового деления t_{Z1} или за счет изменения диаметров и длины статора, а затем повторить расчет.

Число пазов Z_1, пазов на полюс и фазу q_1, параллельных ветвей a, эффективных проводников в пазу u_n, соответствующих окончательно выбранному варианту, можно принять для дальнейших расчетов.

10.8. ПАЗЫ, ОБМОТКА И ЯРМО СТАТОРА

10.8.1. Размеры пазов статора

После того как окончательно установлены число пазов статора и зубцовое деление t_{Z1}, приступают к определению размеров паза и проводников обмотки.

Опыт проектирования и теоретический анализ показывают, что с точки зрения наилучшего использования машины существует оптимум ширины паза b_{n1} к зубцовому делению t_{Z1}. При прямоугольных пазах, которые применяют для машин мощностью выше 100 кВт, оптимальное отношение b_n / t_{Z1} в среднем составляет 0,42, причем небольшие отклонения существенно не отражаются на показателях машины. Исходя из этого, можно предварительно определить ширину паза по соотношению

$$b_{n1} \approx (0{,}34...0{,}50) t_{Z1}. \qquad (10.21)$$

Большие значения относятся к машинам меньших габаритов. Ширину паза берут тем больше, чем выше напряжение машины и чем толще изоляция. При узких пазах снижается коэффициент заполнения паза медью. С другой стороны, с увеличением ширины паза увеличиваются добавочные потери на поверхности полюсных

наконечников. Обычно ширина паза лежит в пределах 10…20 м. Окончательно ширину паза устанавливают после выбора проводников обмотки.

Сечение эффективного проводника обмотки статора

$$q_{эф} = I_{ном.ф}/(aJ_1). \qquad (10.22)$$

Допустимая плотность тока J_1 определяется по произведению AJ_1, которое является характеристикой тепловой нагрузки обмотки и зависит от класса нагревостойкости применяемой изоляции. На рис. 10.16 дана зависимость $AJ_1 = f(\tau)$ для серийных синхронных машин с изоляцией класса В. При применении изоляции класса F значения AJ_1, приведенные на рис. 10.16, можно увеличить на 25…30%, а при изоляции класса Н — на 40…45%.

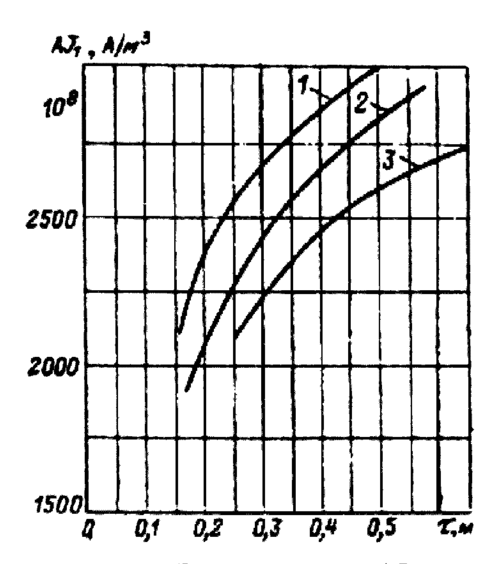


Рис. 10.16. Зависимость AJ_1 от τ для синхронных машин:
1 — 13 и 14-го габаритов; 2 — 16 и 17-го габаритов; 3 — 18—21-го габаритов

Плотность тока

$$J_1 = (AJ_1)/A. \qquad (10.23)$$

При определении размеров проводника можно исходить из следующих рекомендаций.

В целях уменьшения потерь от вихревых токов проводники в паз укладываются плашмя. Размеры проводника по высоте паза — толщину проводника a_1 — не следует брать больше 3…3,5 мм. Поперечное сечение проводника по возможности не должно превышать 18…20 мм². Если найденное сечение $q_{эф}$ больше 18…20 мм², то целесообразно его разбить на несколько элементарных $n_{эл}$ проводников:

$$n_{эл} \geq q_{эф}/(18...20).$$

Число элементарных проводников в одном эффективном в общем случае

$$n_{эл} = n_ш n_в, \qquad (10.24)$$

где $n_ш$ — число элементарных проводников по ширине паза (обычно один или два); $n_в$ — число проводников, располагаемых по высоте паза (от 1 до 4).

Возможная ширина изолированных проводников

$$b'_{1из} = b_{п1} - \delta_{из.п}. \qquad (10.25)$$

Двусторонняя толщина изоляции паза по его ширине $\delta_{из.п}$ зависит от конструкции изоляции и номинального напряжения машины. Примеры выполнения изоляции обмоток статора даны в гл. 3.

В синхронных машинах от 100 кВт и выше, выпускаемых промышленностью в настоящее время, применяется термореактивная или непрерывная изоляция класса нагревостойкости В, спецификация которой дана в табл. 3.5. Двусторонняя толщина этой изоляции составляет 6 мм при $U_{ном} = 10000$ В, 4,7 мм при $U_{ном} = 6000...6600$ В и 2,2 мм при $U_{ном} = 380...400$ В.

Предварительная ширина элементарного проводника с изоляцией

$$b_{1из} \approx \frac{b'_{1из}}{n_{ш}} \leq 7{,}5 \text{ мм}. \qquad (10.26)$$

Ширина этого проводника без изоляции

$$b_1 = b_{1из} - \delta_{1из.пр},$$

где $\delta_{1из.пр}$ — двусторонняя толщина изоляции проводника. Двусторонняя толщина изоляции проводников различных марок дана в табл. П3.4. Для синхронных машин при номинальном напряжении от 3000 до 6000 В для обмотки якоря применяют провода с эмалеволокнистой изоляцией марки ПЭТВСД, не требующие наложения дополнительной витковой изоляции. Двусторонняя толщина изоляции таких проводов равна 0,5 мм.

При номинальном напряжении 10000 В для обмотки якоря применяют провода ПСД. В качестве витковой изоляции накладывают вполнахлеста один слой стеклослюдинитовой ленты толщиной 0,09 мм. При напряжении менее 660 В применяют провода марок ПСД или ПЭТВП. По необходимому сечению элементарного проводника $q_{эл} = q_{эф} / n_{эл}$ и найденной предварительно его ширине b_1 по табл. П3.3 выбирают стандартный ближайший проводник. Одновременно с шириной определяют и высоту проводника a_1. Значения $q_{эл}, b_1, a_1$ для выбранного стандартного проводника принимают за окончательные. По найденным значениям уточняют размеры изолированного элементарного проводника:

$$b_{1из} = b_1 + \delta_{1из.пр};$$

$$a_{1из} = a_1 + \delta_{1из.пр}.$$

После выбора проводников уточняют размеры паза:

ширина паза

$$b_{п1} = n_{ш}, \quad b_{1из} + \delta_{из.п} + \delta_{р.ш} + \delta_{ш}; \qquad (10.27)$$

высота паза

$$h_{п1} = u_{п} n_{в} a_{1из} + \sum \delta_{из} + h_{к} + \delta_{р.в} + \delta_{в}, \qquad (10.28)$$

где $h_к$ — высота клина: $h_к = 4...5$ мм; $\sum\delta_{из}$ — суммарная толщина изоляции по высоте паза (определяется по табл. 3.5); $\delta_{р.ш}, \delta_{р.в}$ — допуски на разбухание изоляции: $\delta_{р.ш} = 0{,}05 n_ш; \delta_{р.в} = 0{,}05 n_в u_п; \delta_ш, \delta_в$ — технологические допуски на укладку: $\delta_ш = \delta_в = 0{,}2$ мм.

Иногда в синхронных машинах применяется возбуждение полюсов от дополнительной обмотки, закладываемой в пазы статора. В зависимости от схемы возбуждения эта обмотка вместе с изоляцией занимает около 20% площади паза. При наличии такой обмотки высоту паза, найденную по (10.28), следует увеличить в 1,2—1,25 раза.

Размеры паза «в свету» округляют до десятых долей миллиметра.

Обычно $h_{п1} / b_{п1}$ = 4…6,5 для машин с $U_{ном}$ = 600…6600 В и 3,5…4,5 для машин с $U_{ном}$ = 380…400 В. Далее производят уточнение сечения эффективного проводника и плотности тока в нем. Сечение эффективного проводника $q_{эф}$ равно сумме сечений элементарных проводников:

$$q_{эф} = n_{эл} q_{эл}. \tag{10.29}$$

Фактическая плотность тока, А/м^2,

$$J_1 = I_{ном.ф} / (a q_{эф}). \tag{10.30}$$

Окончательно размеры паза устанавливают после вычерчивания масштабного эскиза паза, составления его подробной спецификации и проверки максимальной индукции в зубце, индукции в спинке статора, а также перепада температуры в изоляции.

Максимальная индукция в зубце, Тл,

$$B_{Z1\max} = \frac{B_{\delta ном} t_{Z1} l_\delta}{(t_{Z1} - b_{п1}) l_{ст1} k_c}. \tag{10.31}$$

Индукция $B_{Z1\max}$ обычно лежит в пределах 1,6…2 Тл. Индукция в спинке статора, Тл,

$$B_a = \frac{a_\delta B_{\delta ном} \tau l_\delta}{2 h_a l_{ст1} k_c}, \tag{10.32}$$

где $h_a = (D_a - D)/2 - h_{п1}$ — высота спинки статора, м.

Расчетный коэффициент полюсного перекрытия a_δ можно приближенно принять равным 0,65—0,68. Индукция B_a имеет значения 1,2…1,45 Тл.

Коэффициент заполнения пакета сталью k_c берется из табл. 2.1.

Статоры синхронных машин при частоте 50 Гц чаще всего выполняют из лакированных листов толщиной 0,5 мм $(k_c = 0.93)$.

Перепад температуры в изоляции паза

$$\Delta\vartheta_{из.п} = \frac{J_1 A k_ф}{4{,}2 \cdot 10^{11}} \frac{t_{Z1}}{2 \cdot (b_{п1} + h_{п1} - h_к)} \frac{0{,}5 \delta_{из.п}}{\lambda_п}, \tag{10.33}$$

где $k_ф$ — коэффициент добавочных потерь: $k_ф$= 1,03…1,1; $\lambda_{из}$ — теплопроводность изоляции: $\lambda_{из}$=$1\cdot10^{-5}$ Вт/(м·^{0}С) — для некомпаундированной изоляции; $\lambda_{из}$=$1{,}6\cdot10^{-5}$ Вт/(м·^{0}С) для компаундированной изоляции; $\lambda_{из}$=$2{,}2\cdot10^{-5}$ Вт/(м·^{0}С) для изоляции, выполненной по способу «монолит».

Для изоляции класса нагревостойкости В перепад температуры $\Delta\vartheta_{из.п}$ не должен превышать 30…35 ^{0}С.

В (10.31)—(10.33) линейные размеры подставляются в метрах, J — в А/м^2, A — в А/м, B — в Тл.

Если индукции или $\Delta\vartheta_{из.п}$ превышают рекомендуемые пределы, то следует скорректировать размеры паза и проводов.

Как сказано выше, для машин низкого напряжения мощностью до 100 кВт (5—9-й габариты) в основном применяют полузакрытые пазы со всыпной обмоткой. Данные об изоляции таких пазов приведены в табл. 3.1. В синхронных машинах, выпускаемых в настоящее время промышленностью, для обмоток статора применяют изоляцию класса «монолит». Обмотку выполняют из круглых проводников. Марку проводников выбирают в зависимости от принятой нагревостойкости изоляции. При нагревостойкости изоляции класса В рекомендуется применять провода марок ПЭТВ, ПЭТВМ или ПСД, а при классе F — провода ПЭТ-155, ПЭТМ, ПСД, ПСДКТ. Возможно, также применение проводников и других марок (см. гл. 2). При выполнении обмотки из круглых проводников не следует их диаметр выбирать более 2 мм, так как при больших сечениях эффективного проводника его целесообразно разбить на несколько элементарных $n_{эл}$, а иногда выполнить обмотку в несколько a параллельных ветвей.

Сечение элементарного проводника, м^2,

$$q_{эл} = I_{ном.ф}/(n_{эл}aJ_1)\,. \qquad (10.34)$$

Путем подбора $n_{эл}$ и a добиваются, чтобы $q_{эл} < 3{,}1\cdot 10^{\ 6}$ м^2 $(d_{эл} < 2\cdot10^3\,м)$. Плотность тока при изоляции класса нагревостойкости В выбирают в пределах (6,9—7,5) ·10^6 А/м для машин с $n_{ном} = 1500$ об/мин и (5,9—6,5) ·10^6 А/м для машин с $n_{ном} = 1000$ об/мин. Нижние пределы соответствуют более мощным машинам. При изоляции класса нагревостойкости F плотность тока в проводниках может быть повышена в 1,15 раза, а при изоляции класса нагревостойкости Н — в 1,25 раза. По найденному сечению из табл. П3.1 подбирают размеры стандартного провода, после чего определяют сечение эффективного проводника и уточняют плотность тока.

Необходимую площадь паза $S'_п$, для размещения изолированных проводников находят, задавшись коэффициентом заполнения $k_з$.

$$S'_п = (u_п n_{эл} d^2_{эл.из})/k_з, \qquad (10.35)$$

где $d_{эл.из}$ — диаметр элементарного изолированного проводника; $S'_п$ — сечение паза без учета пазовой изоляции, площади клина и междукатушечной прокладки; $k_з$ — коэффициент заполнения: $k_з = 0{,}68...0{,}74$; меньшие значения рекомендуется выбирать для относительно длинных машин с большим числом проводников в пазу $u_п$. При наличии дополнительной обмотки в пазах статора площадь $S'_п$ следует увеличить в 1,25 раза.

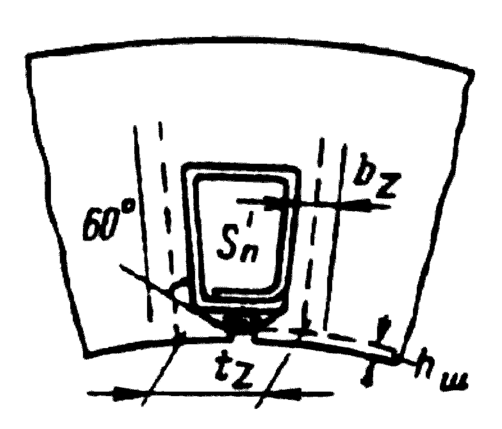


Рис. 10.17. К определению размеров полузакрытого паза при всыпной обмотке

Размеры паза устанавливают после вычерчивания в масштабе одного зубцового деления (рис. 10.17). Сначала на чертеже наносят зубцы. Зубец, кроме верхней своей части, имеет одинаковую ширину b_Z, которую можно определить, исходя из допустимого значения индукции $B_{Z1\max}$:

$$b_Z = \frac{B_{\delta ном} t_Z l_\delta}{B_{Z1\max} l_{ст1} k_c}. \tag{10.36}$$

Значения $B_{Z1\max}$ выбирают в пределах 1,55…1,85 Тл; высота клина 2,5…3 мм.

Пространство, ограниченное зубцами и клином, за вычетом изоляции представляет часть паза, в котором размещаются проводники обмотки. Высоту этой части подбирают, исходя из того, чтобы площадь образовавшейся фигуры (на рис. 10.17 — трапеции) была равна $S'_п$. Для свободного проталкивания проводника при укладке обмотки ширину щели полузакрытых пазов выбирают на 1,5…2 мм больше диаметра изолированного проводника. Высота шлица $h_ш = 0{,}7...1$ мм. После того как будут установлены размеры паза, следует по (10.32) проверить индукцию в спинке статора.

10.8.2. Обмотка статора.

Эффективные витки в фазе обмотки статора

$$w_1 = 2pq_1 \frac{u_п}{2} \frac{1}{a}. \tag{10.37}$$

Двухслойные обмотки статора, как правило, выполняют с укороченным шагом. Шаг обмотки обычно выбирают в пределах

$$y_1 = (0{,}8...0{,}86)\tau_п, \tag{10.38}$$

где $\tau_п = 3q_1, y_1$ округляют до целого числа; $y/\tau_п = \beta < 1$.

Коэффициент укорочения

$$k_y = \sin(\pi\beta/2). \tag{10.39}$$

Коэффициент распределения

$$k_P = \frac{0,5}{q_1 \sin(30^0 / q_1)}. \qquad (10.40)$$

При дробном числе пазов на полюс и фазу в (10.40) вместо q_1 подставляют $(bd + c)$.

Обмоточный коэффициент

$$k_{об} = k_y k_P. \qquad (10.41)$$

10.9. ВОЗДУШНЫЙ ЗАЗОР И ПОЛЮСЫ РОТОРА

Воздушный зазор в основном определяет технико-экономические показатели машин. С одной стороны, при увеличении зазора возрастают размеры обмотки возбуждения и потери в этой обмотке. С другой стороны, при малых зазорах повышаются добавочные потери на поверхности полюсных наконечников, а также появляется опасность при деформации ротора задевания его о статор. От зазора зависят возможные кратковременные перегрузки синхронной машины по моменту и мощности. На максимальные значения момента $M_{\max}$ и электромагнитной мощности $P_{эм}$ существенное влияние оказывает синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси x_d . Чем больше зазор, тем меньше индуктивное сопротивление x_d и, следовательно, большими будут кратности максимальных значений момента $M_{\max} / M_{ном}$ и мощности $P_{эм} / P_{ном}$. В синхронных машинах общего назначения при выборе воздушного зазоры обычно исходят из значения x_d, при котором $M_{\max} / M_{ном}$ или $P_{эм} / P_{ном}$ будут иметь необходимые значения. Связь между x_d и зазором δ устанавливается известным соотношением

$$x_{ad*} = \frac{k_{ad}}{k_{\mu 0}} \frac{F_{аном}}{F_{\delta 0}} = \frac{k_{ad} 0,45 m I_{ном.ф} \dfrac{w_1 k_{об1}}{p}}{k_{\mu 0} \dfrac{B_{\delta 0}}{\mu_0} \delta k_\delta}. \qquad (10.42)$$

Учитывая, что $2 m w_1 I_{ном.ф} / (2 p \tau) = A$, после преобразований получаем

$$x_{ad*} = \frac{0,45 k_{ad} k_{об1} A \tau}{k_{\mu 0} \dfrac{B_{\delta 0}}{\mu_0} \delta k_\delta}, \qquad (10.43)$$

где $x_{ad*} = x_{d*} - x_{\sigma*}$ — индуктивное сопротивление продольной реакции якоря; $x_{\sigma*}, x_{d*}$ — индуктивные сопротивления рассеяния и синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси; k_δ — коэффициент воздушного зазора; k_{ad} — коэффициент продольной реакции якоря по рис. 10.23; $k_{\mu 0}$ — коэффициент, учитывающий влияние магнитных напряжений стальных участков магнитной цепи

и стыков между полюсом и ярмом для ненасыщенной машины; $B_{\delta 0} \approx 0{,}95 B_{\delta ном}$ — максимальная индукция в зазоре при холостом ходе и номинальном напряжении, Тл; $\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{6}$ Г/м — магнитная постоянная.

Если принять в среднем $k_{об1} = 0{,}92, k_{ad} = 0{,}82, k_\delta = 1{,}3, x_{ad} = 0{,}92 x_d$ и $k_{\mu 0} = 1{,}07...1{,}3$ то получим

$$\delta \approx (0{,}27...0{,}33) \cdot 10^{6} \frac{\grave{A}}{\hat{A}_{\delta 0}} \frac{\tau}{x_{d*}}. \qquad (10.44)$$

В (10.44) подставляют A в А/м, B — в теслах, τ — в м, тогда δ получаем в метрах. Коэффициент в скобках выбирают тем меньше, чем большее значение имеет x_{d*}. Нижний его предел соответствует $x_{d*} \geq 1{,}9$.

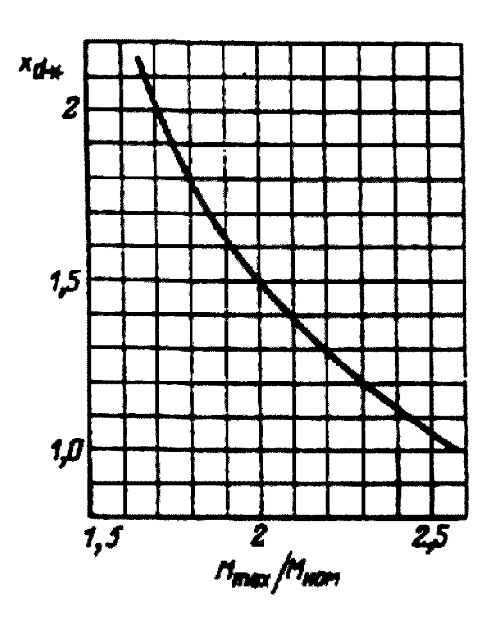


Рис. 10.18. Зависимость x_{d*} от $M_{\max} / M_{ном}$

На рис. 10.18 дана зависимость $x_{d*} = f(M_{\max} / M_{ном})$, полученная на основании осреднения расчетных данных явнополюсных синхронных машин общего назначения. По этой зависимости, исходя из заданного значения $M_{\max} / M_{ном} = P_{эм} / P_{ном}$, можно предварительно найти x_{d*} и подставить в (10.44). Для синхронных двигателей согласно ГОСТ 183 $M_{\max} / M_{ном} \geq 1{,}65$. Такое же значение можно принимать для кратности максимальной мощности у генераторов. Обычно отношение $M_{\max} / M_{ном}$ лежит в пределах 1,65…2,5.

В современных синхронных машинах воздушный зазор по ширине полюсного наконечника делают неодинаковым. Чтобы получить распределение магнитного поля, приближающегося к синусоидальному, зазор под краями полюсов берут примерно в 1,5 раза больше, чем в середине, т. е. $\delta_m / \delta \approx 1{,}5$, где δ — зазор под серединой полюса. С этой целью радиус дуги полюсного наконечника выбирают меньше внутреннего радиуса статора (рис. 10.19):

$$R_P = \frac{D}{2 + 8D \dfrac{\delta_m - \delta}{b_P^2}}. \qquad (10.45)$$

Среднее значение зазора принимают равным:

$$\delta' = \delta + \frac{1}{3}(\delta_m - \delta). \qquad (10.46)$$

Равномерный воздушный зазор по всей ширине полюсного наконечника в настоящее время применяют иногда в машинах небольшой мощности.

Длина полюсной дуги

$$b_P = \alpha \tau, \qquad (10.47)$$

где α — коэффициент полюсного перекрытия (конструктивный).

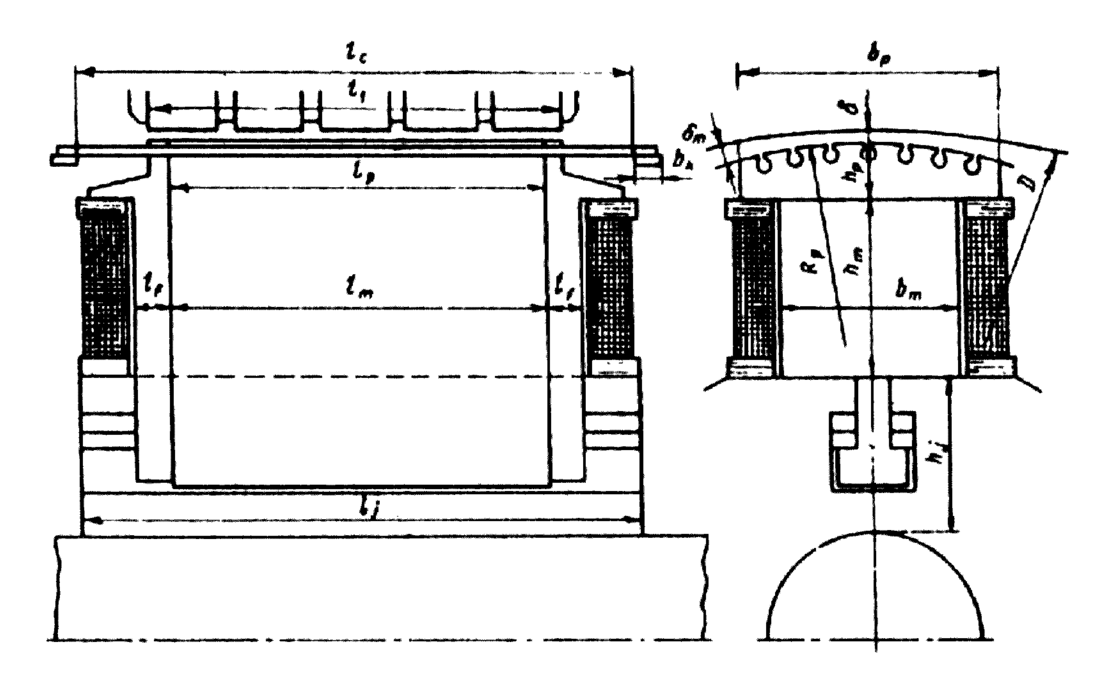


Рис. 10.19. Размеры ротора синхронной явнополюсной машины

При $2p \geq 8$ хорда, соединяющая края полюсного наконечника, практически не отличается от дуги.

От α зависит использование активного объема машины. С увеличением α при прочих равных условиях уменьшается объем активной части машины, но возрастает поток рассеяния полюсов. Обычно α выбирают в пределах 0,68…0,73.

Полюсы чаще всего выполняют шихтованными. В крупных машинах для полюсов используют сталь Ст3 толщиной 1 или 1,4 мм. Запрессовку сердечников полюсов осуществляют с помощью нажимных щек и шпилек.

Полюсы в быстроходных машинах при $v_p \approx \pi Dn/60 > 30$ м/с прикрепляют с помощью хвостов к шихтованному остову (см. рис. 10.3 и 10.19), а в тихоходных машинах приворачивают шпильками к ободу магнитного колеса (см. рис. 10.2). Шихтованный обод и магнитное колесо изготавливают из стали Ст3.

У машин мощностью меньше 100 кВт полюсы собирают из листов электротехнической стали и прикрепляют проходящими через них болтами к напрессованной на вал втулке или непосредственно к валу. Применяют конструкцию ротора, показанную на рис. 10.7. Более подробно о креплении полюсов изложено в § 9.5.

Высоту полюсного наконечника h_p (см. рис. 10.19) выбирают, исходя из того, чтобы была возможность разместить на его краях стержни демпферной (пусковой) клетки, а также из условий достаточной механической прочности. В табл. 10.9 приведены значения h_p в зависимости от полюсного деления машины.

Длины полюсного наконечник l_p и полюса l_m по оси машины принимают равными длине статора l_1 (или на 1—2 см меньше).

Таблица 10.9. **Значения h_p в зависимости от полюсного деления машины**

τ, см	15—20	20—30	30—40	40—50	50—60	Примечание
h_p, см	2,2—3	3—4	4—5	5—6	6—7,5	При наличии демпферной клетки
h_p, см	1,6—2,2	2,2—3	3—3,7	3,7—4,5	4,5—5,5	При отсутствии демпферной клетки

Высота полюсного сердечника h_m, м, предварительно может быть найдена по одной из следующих формул:

для машин 16—20-го габаритов:

$h_m \approx 0{,}016 + 0{,}186\sqrt[4]{\tau}$;

для машин 10—15-го габаритов при $2p > 6$:

$h_m \approx 10{,}5 + 0{,}08$; (10.48)

для машин 10—15-го габаритов при $2p \le 6$:

$h_m \approx (0{,}45...0{,}55)b_p$;

для машин небольшой мощности (до 100 кВт):

$h_m \approx (0{,}3...0{,}35)D - (h_p + \delta)$.

В (10.48) τ, δ, b_p, h_p и D подставляют в метрах.

Окончательно высоту h_m устанавливают после расчета и укладки обмотки возбуждения (см. § 10.15) и вычерчивания эскиза с расположением ее проводников в межполюсном пространстве.

Ширину полюсного сердечника b_m определяют, исходя из допустимого значения индукции B_m в основании полюса. При определении индукции B_m необходимо учитывать поток рассеяния полюса Φ_σ. Этот поток наряду с основным потоком Φ проходит по сердечнику полюса (см. § 10.11). Таким образом, поток полюса

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi(1 + \Phi_\sigma / \Phi) = \Phi\sigma_m, \tag{10.49}$$

где $\sigma_m = (1 + \Phi_\sigma / \Phi)$ — коэффициент рассеяния.

Поток и коэффициент рассеяния зависят от размеров полюса, которые пока неизвестны. Предварительно коэффициент рассеяния можно определить так:

$$\sigma_m \approx 1 + k\frac{0{,}35\delta}{\tau^2}, \tag{10.50}$$

где δ и τ — в метрах; k — коэффициент, зависящий от высоты полюсного наконечника h_p.

При выборе коэффициента k можно руководствоваться следующими данными:

h_p, см	3	4	5	6	7
k	7	8,5	10	11	12

Тогда ширину полюсного сердечника находят по следующей формуле

$$b_m = \frac{a_\delta B_{\delta ном} \tau l_\delta}{B_m k_{cp} l'_m} \sigma_m . \qquad (10.51)$$

Коэффициент заполнения полюса сталью k_{cp} принимают при толщине листов 1 мм — 0,95, при толщине листов 1,4 мм — 0,97. Индукцию B_m выбирают в пределах 1,4…1,6 Тл.

Расчетная длина сердечника полюса, м,

$$l'_m = l_m + l_f , \qquad (10.52)$$

где l_f — толщина одной нажимной щеки полюса, м:

$$l_f = (1{,}5...3) \cdot 10^{2} .$$

В (10.52) принимают l_f, а не $2l_f$, чтобы приближенно учесть ослабление сечения щек за счет закругления краев и отверстий для гаек стяжных шпилек.

Размеры остова или обода магнитного колеса l_j в большинстве случаев определяются конструктивными соображениями и требованиями механической прочности и получаются больше, чем это необходимо для проведения магнитного потока. Ввиду этого при электромагнитном расчете определяют длину остова или обода l_f и их минимально возможную толщину h_j. В дальнейшем при размещении обмотки возбуждения на полюсе и при разработке конструкции толщина остова или обода, а также их внешние диаметры и размеры самого полюса должны быть уточнены:

$$l_j = l_m + \Delta l_c , \qquad (10.53)$$

для крупных машин $\Delta l_c = (10...15) \cdot 10^{2}$ м, для средних $\Delta l_c = (4...5) \cdot 10^{2}$ м и для малых $\Delta l_c = 0$;

$$h_j = \frac{a_\delta B_{\delta ном} \tau l_\delta}{B_j l_j} \sigma_m . \qquad (10.54)$$

Индукция B_j выбирается в пределах 1…1,3 Тл.

10.10. РАСЧЕТ ДЕМПФЕРНОЙ (ПУСКОВОЙ) ОБМОТКИ

Демпферную (пусковую) обмотку размещают в пазах полюсных наконечников ротора (рис. 10.20, *а*). Эта обмотка в генераторах служит для ослабления обратного синхронного поля при несимметричной нагрузке, успокоения качаний ротора, предотвращения динамических перенапряжений при несимметричных коротких замыканиях и повышения электродинамической стойкости. В двигателях эта обмотка необходима для асинхронного пуска и успокоения качаний ротора.

Расчет демпферной обмотки заключается в определении количества и размеров стержней обмотки, а также размеров короткозамыкающих сегментов. Короткозамыкающие сегменты замыкают все стержни с торцов полюса и соединяются с сегментами соседних полюсов, образуя кольцо (рис. 10.20, *б*). В этом случае демпферная обмотка носит название продольно-поперечной. Если сегменты соседних полюсов не соединяются между собой (рис. 10.20, *в*), то обмотка называется продольной. Наиболее часто применяют продольно-поперечные демпферные обмотки.

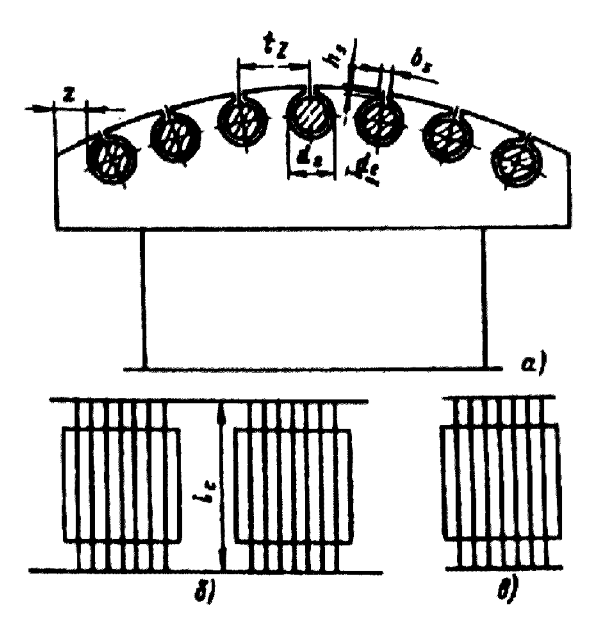


Рис. 10.20. Демпферная (пусковая) обмотка: *а* — расположение обмотки на полюсе; *б* — продольно-поперечная обмотка; *в* — продольная обмотка

Для машин общего назначения число стержней N_c на полюс выбирают обычно в пределах от 5 до 10. Стержни выполняют из меди или латуни круглого сечения. Чаще всего демпферную (пусковую) обмотку выполняют из медных стержней. Стержни из латуни применяют в тех случаях, когда необходимо получить большие значения начального пускового момента у синхронных двигателей. Иногда для повышения пускового момента обмотку изготовляют из разнородных материалов — крайние стержни клетки делают из латуни, а остальные — из меди. Поперечное сечение всех стержней, расположенных на полюсе, принимают равным 0,15…0,35 сечения меди обмотки статора, приходящейся на полюс. Исходя из этого, сечение стержня

$$q_c = \frac{(0{,}15...0{,}35)\tau A}{N_c J_1}. \tag{10.55}$$

Коэффициент в скобках (10.55) для генераторов принимается равным 0,15…0,25, для двигателей 0,25…0,35.

Диаметр стержня

$$d_c = 1{,}13\sqrt{q_c} \tag{10.56}$$

округляют до размера, кратного 0,5 мм.

Зубцовый шаг на роторе

$$t_{Z2} = \frac{b_p - d_c - 2z}{N_c - 1}, \tag{10.57}$$

где z — расстояние между крайним стержнем и краем полюсного наконечника: $z \geq (0{,}3...0{,}7)\cdot 10^{2}$ м.

Кроме выполнения основной своей задачи демпферная обмотка снижает амплитуды гармоник магнитного поля, обусловленных зубчатостью статора. Эти гармоники и вызывают пульсацию ЭДС в обмотке статора и образуют токи и добавочные потери в самой демпферной обмотке. Для того чтобы демпферная обмотка наилучшим образом выполняла свои задачи, при ее проектировании следует соблюдать следующие требования.

В генераторах для уменьшения, добавочных потерь и искажения ЭДС желательно иметь зубцовый шаг на роторе t_{Z2} возможно более близким к зубцовому шагу статора t_{Z1}. Если число пазов на полюс и фазу в статоре q_1 — целое число, или, $q_1 = b + c/d = b + 1/2$, или $(bd + c) \le 9$, то $0{,}8t_{Z1} < t_{Z2} < t_{Z1}$.

Для исключения из кривой ЭДС высших гармонических, обусловленных зубчатостью статора, необходимо иметь:

$$t_{Z2} = \frac{k}{N_c - 1}\frac{6q_1}{6q_1 + 1}t_{Z1}; \qquad (10.58)$$

$$2\tau / t_{Z2} - (6q_1 \pm 1) \ge 3, \qquad (10.59)$$

где N_c — число стержней в полюсе; k — целое число, близкое к ($N_c - 1$).

При достаточно высокой дробности зубцовые гармонические в кривой ЭДС не проявляются, поэтому при $(bd + c) > 9$ можно принимать $t_{Z2} = t_{Z1}$.

Исходя из этого необходимо найденное в (10.59) значение зубцового шага проверить на соответствие указанным требованиям и в случае их невыполнения сделать пересчет, задавшись другими значениями N_c и z.

В двигателях для уменьшения добавочных потерь и исключения «прилипания» ротора число стержней N_c и их шаг t_{Z2} выбирают так чтобы

$$t_{Z2} \ge 0{,}8t_{Z1};$$
$$(N_c - 1)(1 - t_{Z2} / t_{Z1}) > 0{,}75 \qquad (10.60)$$

Пазы на роторе выбирают круглые, полузакрытые. Диаметр паза d_s, мм, равен $d_c = 0{,}1...0{,}2$. Ширина шлица паза $b_s = 3...4$ мм, высота $h_s = 2...3$ мм. В дальнейшем при расчете параметров и пусковых характеристик раскрытие паза может быть уточнено.

Длина стержня l_c, м, предварительно может быть принята равной:

$$l_c = l_p + (0{,}2...0{,}4)\tau. \qquad (10.61)$$

Окончательно длину стержня устанавливают при разработке конструкции.

Сечение короткозамыкающего сегмента выбирают примерно равным половине сечения стержней одного полюса:

$$q_{к.з} = b_{к.з} h_{к.з} = (0{,}85...1{,}15)0{,}5 N_c q_c .$$

По найденному сечению выбирают стандартную полосовую медь (см. табл. П3.6) толщиной $b_{к.з}$ не менее $\frac{2}{3} d_c$ [2].

10.11. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи проводят в целях определения МДС обмотки возбуждения F_{f0}, необходимой для создания магнитного потока машины Φ при холостом ходе [6].

При вращении ротора этот поток наводит в обмотке статора ЭДС. Таким образом, в результате расчета магнитной цепи может быть построена зависимость $E = f(F_{f0})$, которая носит название характеристики холостого хода.

При расчете магнитной цепи задаются фазной ЭДС E в обмотке статора и по известному выражению определяют полезный поток, Вб;

$$\Phi = E/(4 k_B f w_1 k_{об1}), \qquad (10.62)$$

где w_1 и $k_{об1}$ — число витков, и обмоточный коэффициент фазы статора; f — частота, Гц; k_B — коэффициент формы поля, представляющий собой отношение действующего значения индукции к ее среднему значению.

При синусоидальном распределении магнитного потока в зазоре машины коэффициент формы поля $k_B = 1{,}11$. Однако, в синхронных машинах магнитное поле имеет несинусоидальную форму. Характер распределения этого поля зависит от ширины и конфигурации полюсного наконечника, а также от относительной длины воздушного зазора δ/τ. Для определения коэффициента формы поля k_B в этом случае можно воспользоваться кривыми рис. 10.21, *а,б*.

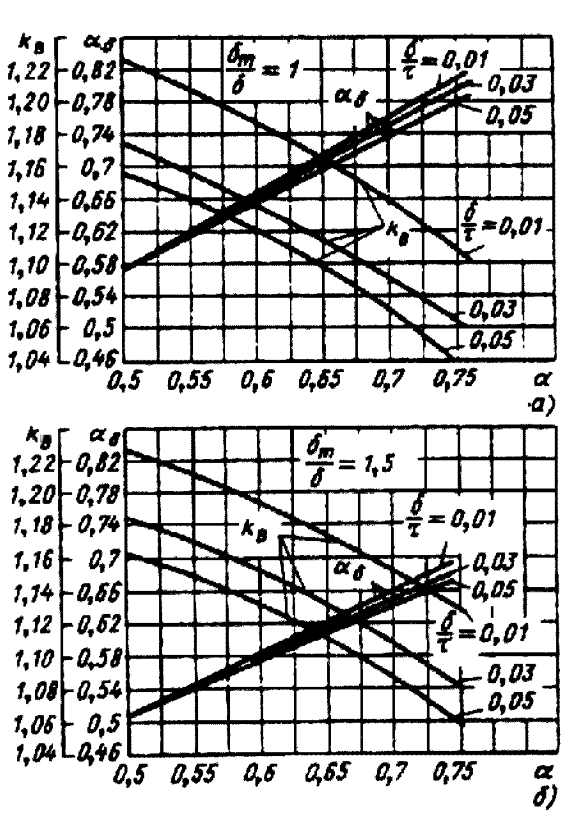


Рис. 10.21. $\alpha_s = f(\alpha)$ и $K_B = f(\alpha)$ для синхронной машины: *а* — при $S_m/\delta = 1$; *б* — $S_m/\delta = 1{,}5$

По найденному потоку определяют максимальное значение индукции в воздушном зазоре машины, Тл:

$$B_\delta = \Phi/(a_\delta \tau l_\delta), \qquad (10.63)$$

где a_δ — расчетный коэффициент полюсного перекрытия, равный отно-

шению расчетной длины полюсной дуги b_δ к полюсному делению τ. Этот коэффициент определяют по рис. 10.21 в зависимости от a и δ/τ; l_δ — полюсное деление и расчетная длина, м.

Расчетную длину магнитопровода (уточняют значение) определяют по формуле

$$l_\delta = l_1 - b'_к n'_к + 2\delta', \tag{10.64}$$

где

$$b'_к = \gamma\delta; \qquad \gamma = (b_к\delta)^2/(5 + b_к/\delta).$$

Магнитодвижущую силу обмотки возбуждения определяют как сумму магнитных напряжений отдельных участков магнитной цепи машины.

1. Магнитное напряжение воздушного зазора, А,

$$F_\delta = \frac{1}{\mu_0} B_\delta \delta k_\delta, \tag{10.65}$$

где B_δ — в Тл; δ — в ми $\mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{\ 6}$ Гн/м.

Коэффициент воздушного зазора k_δ учитывает зубчатое строение статора и ротора. Из-за наличия зубцов и пазов происходит перераспределение потока в зазоре, в результате чего индукция, а, следовательно, и магнитное напряжение зазора над коронками зубцов возрастают. Этот коэффициент равен произведению коэффициентов воздушного зазора для статора $k_{\delta 1}$ и ротора $k_{\delta 2}$:

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2}. \tag{10.66}$$

Коэффициент $k_{\delta 1}$ и $k_{\delta 2}$ определяют по эмпирическим формулам

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{Z1} + 10\delta'}{t_{Z1} - b_{п1} + 10\delta'};$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{Z2} + 10\delta'}{t_{Z2} - b_s + 10\delta'}, \tag{10.67}$$

где t_{Z1} и t_{Z2} — зубцовые шаги статора и ротора; $b_{п1}$ и b_s — ширина паза статора и прорези паза ротора; при полузакрытых пазах на статоре $b_{п1}$ — ширина прорези паза; $б$ — по (10.46).

2. Магнитное напряжение зубцов статора, А,

$$F_{Z1} = H_{Z1} h_{п1}. \tag{10.68}$$

Для упрощения расчета магнитного напряжения зубцов, имеющих трапециевидную форму, напряженность магнитного поля H_{Z1} находят по значению индукции B_{Z1} для одного сечения, расположенного от коронки на высоте $1/3$ высоты паза $h_{п1}$:

$$B_{Z1} = \frac{B_\delta t_{Z1} l_\delta}{b_{Z1\,1/3} l_{ст1} k_c}. \tag{10.69}$$

Ширина зубца на высоте $\frac{1}{3}h_{n1}$ от его коронки

$$b_{Z1\frac{1}{3}} = t_{Z1\frac{1}{3}} - b_{n1}, \tag{10.70}$$

где

$$t_{Z1\frac{1}{3}} = \frac{\pi(D + 2h_{n1}/3)}{Z_1}.$$

Высоту паза h_{n1} и другие линейные размеры в формулы (10.68) и (10.70) подставляют в метрах, B_δ — в теслах и H_{Z1} — в амперах на метр; l_{cm} по (10.10).

Для машин небольшой мощности, имеющих полузакрытые пазы, зубец по большой части своей высоты имеет прямоугольную форму, и в этом случае B_{Z1} и H_{Z1} определяют для сечения, расположенного на высоте $\frac{1}{2}$ высоты h_{n1}.

При нахождении H_{Z1}, соответствующего полученному значению индукции, используют кривые намагничивания стали, из которой выполнена магнитная система статора. У выпускаемых в настоящее время синхронных машин магнитопроводы статора выполняют из горячекатаных сталей марок 1211 для машин мощностью до 100 кВт и 1511, 1512, 1413 для более мощных машин.

При разработке новых машин возможно также применение изотропных холоднокатаных сталей, имеющих лучшие магнитные характеристики по сравнению с горячекатаными. Для машин относительно небольшой мощности целесообразно применение сталей марки 2013 или 2312, и для более мощных машин — марки 2411.

При значениях $B_{Z1} \le 1{,}8$ Тл для горячекатаной стали и $B_{Z1} \le 1{,}9$ Тл для холоднокатаной стали H_{Z1} для выбранной марки стали определяют по основным кривым намагничивания (см. приложение 1). При больших значениях индукции необходимо учитывать, что из-за насыщения зубцов часть потока будет ответвляться в пазы и вентиляционные каналы. Напряженность H_{Z1} в этом случае для выбранной марки стали определяют по индукции B_{Z1} по одной из кривых (см. приложение 2), построенных для различных отношений площади воздушных частей к площади зубцов в данном сечении:

$$k_{n\frac{1}{3}} = \frac{t_{Z1\frac{1}{3}} l_1}{b_{Z1\frac{1}{3}} l_{cm1} k_c} - 1. \tag{10.71}$$

3. Магнитное напряжение для спинки статора, А,

$$F_a = \xi L_a H_a, \tag{10.72}$$

где L_a — длина магнитной линии в спинке статора, м:

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{4p}, \tag{10.73}$$

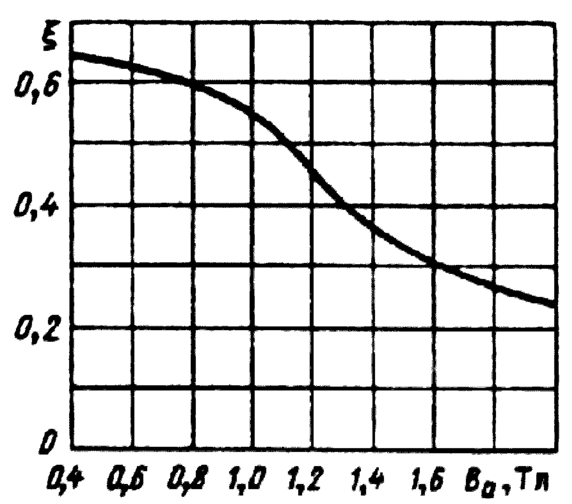


Рис. 10.22. Зависимость коэффициента ξ от индукции в ярме

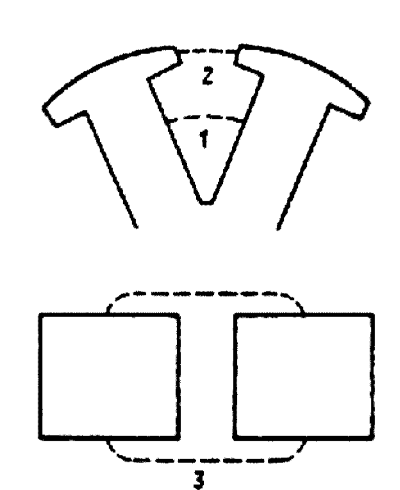


Рис. 10.23. К расчету потоков рассеяния полюсов

ξ — коэффициент, выбираемый по рис. 10.22 и учитывающий неравномерное распределение индукции по поперечному сечению спинки статора; H_a — напряженность магнитного поля в спинке статора, А/м.

Напряженность H_a определяют в соответствии с индукцией B_a по той же кривой намагничивания, что и для зубцов статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 l_{cm1} h_a k_c}. \qquad (10.74)$$

4. Магнитное напряжение зубцов ротора, А,

$$F_{Z2} = H_{Z2} h_{Z2}. \qquad (10.75)$$

Высота зубца ротора, м (см. рис. 10.20),

$$h_{Z2} = h_s + d_s. \qquad (10.76)$$

Напряженность магнитного поля зубцов определяют из кривой намагничивания стали ротора по индукции в зубце B_{Z2}. Для роторов крупных машин для полюсов применяют сталь Ст3. У машин небольшой мощности полюсы изготовляют из стали 1211. Соответствующие кривые намагничивания даны в приложении 1. Индукцию B_{Z2}, Тл, и соответствующую ей напряженность магнитного поля H_{Z2} определяют для одного сечения зубца ротора, расположенного от коронки зубца на расстоянии $\frac{1}{3} h_{Z2}$:

$$B_{Z2} = \frac{B_\delta t_{Z2} l_\delta}{b_{Z2\frac{1}{3}} l_p k_{cp}}, \qquad (10.77)$$

где ширина зубца, м,

$$b_{Z2\frac{1}{3}} = \frac{D - 2\delta - 2/3 h_{Z2}}{D - 2\delta} t_{Z2} - 0{,}94 d_s. \qquad (10.78)$$

При $B_{Z2} > 1{,}8$ Тл необходимо учитывать потоки, вытесняемые в паз, так же как это было показано для зубцов статора.

5. Магнитное напряжение полюса, А,

$$F_m = h_{mp} H_m, \tag{10.79}$$

где $h_{mp} = h_m + h_p$ — расчетная длина силовой линии в полюсе, м; H_m — напряженность поля у основания полюса, А/м.

Напряженность поля H_m определяют из кривых намагничивания по индукции в основании полюса B_m.

При определении индукции B_m следует, исходя из найденных размеров полюса (см. рис. 10.19), произвести уточнение потока рассеяния Φ_σ. Поток рассеяния Φ_σ можно подразделить на три составляющие (рис. 10.23):

1) поток рассеяния между внутренними поверхностями сердечников полюсов (линия 1);

2) поток рассеяния между внутренними поверхностями полюсных наконечников (линия 2);

3) поток рассеяния между торцевыми поверхностями полюсов (линия 3). В соответствии с этим Φ_σ, Вб, можно найти по следующему выражению:

$$\Phi_\sigma = 4\lambda_{m\sigma} l_m (F_\sigma + F_{Z1} + F_a + F_{Z2}), \tag{10.80}$$

где l_m — расчетная длина сердечника полюса, м; $\lambda_{m\sigma} = \lambda_{ml} + \lambda_{pl} + \lambda_{mb}$ — удельная магнитная проводимость для потока рассеяния на одну сторону полюса.

Удельная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями сердечников полюсов

$$\lambda_{ml} = \frac{0{,}55 h_m}{\tau - b_m - \dfrac{\pi}{2p}(h_m + 2h_p + 2\delta)} \cdot 10^{-6}. \tag{10.81}$$

Удельная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями полюсных наконечников

$$\lambda_{pl} = \left[1{,}4\left(\frac{d_t}{d_p} - 0{,}25\right) + 0{,}55\left(\frac{c_p}{d_p} + 0{,}2\right) - 0{,}4\left(\frac{c_p}{d_p} - 0{,}5\right)^2\right] \cdot 10^{-6}. \tag{10.82}$$

Удельная проводимость рассеяния между торцевыми поверхностями

$$\lambda_{mb} = 0{,}37 \frac{b_m}{l_m} \cdot 10^{-6}. \tag{10.83}$$

Здесь принято $c_p = (b_p - b_m)/2; d_p = \tau - b_p - \tau d_t / p; d_t = h_p + \delta - b_p^2 / 4D$, при $d_t / d_p < 0{,}025$ первым членом в (10.82) пренебрегают.

Индукция, Тл,

$$B_m = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{l_m b_m k_{cp}}. \tag{10.84}$$

Если индукция B_m в основании полюса превышает 1,6 Тл, то следует проводить уточненный расчет, учитывающий изменение потока по высоте полюса. Для этого определяют потоки в трех сочетаниях полюса: у его основания $\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma$, у полюсного наконечника $\Phi'_m = \Phi + \Phi_\sigma \dfrac{\lambda_{pl}}{\lambda_{m\sigma}}$ и в среднем сечении $\Phi_{mcp} = (\Phi_m + \Phi'_m)/2$. Деля эти потоки на площадь поперечного сечения полюса, определяют индукции, а затем и магнитные напряжения H_m, H'_m, H_{mcp}.

Расчетное значение напряженности полюса определяют по приближенной формуле

$$H_{mp} = \frac{1}{6}(H_m + H'_m + 4H_{mcp}). \tag{10.85}$$

6. Магнитное напряжение стыка между полюсом и ярмом ротора определяют по индукции в основании полюса B_m, А:

$$F_{\delta mj} = 250 B_m. \tag{10.86}$$

7. Магнитное напряжение в остове или ободе ротора, А,

$$F_j = L_j H_j, \tag{10.87}$$

где $L_j = \dfrac{\pi(D - 2\delta - 2h_{mp} - h_j)}{4p}$ — длина магнитной линии в остове, м; H_j — напряженность магнитного поля, А/м, определяемая по кривой намагничивания, исходя из индукции B_j.

Индукция в остове или ободе магнитного колеса, Тл, с некоторым приближением может быть определена так:

$$B_j = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2 l_j h_j k_{cp}}. \tag{10.88}$$

При нешихтованном ободе $k_{cp} = 1$.

Обычно в средних и крупных машинах магнитное напряжение F_j относительно мало и при расчете магнитной цепи не учитывается.

Просуммировав магнитные напряжения всех участков магнитной цепи, определяют МДС обмотки возбуждения на один полюс при холостом ходе:

$$F_{f0} = F_\delta + F_{Z1} + F_a + F_{Z2} + F_m + F_{\delta mj} + F_j. \tag{10.89}$$

Проделав подобный расчет для ряда значений ЭДС, получают характеристику холостого хода $E = f(F_{f0})$. Для расчетов можно задаваться следующими значениями ЭДС: 0,5; 1,1; 1,2 и 1,3$U_{ном.ф}$. Полученные результаты сводят в таблицу (см. пример расчета). Характеристику холостого хода целесообразно выразить в относительных единицах и сравнить ее с нормальной характеристикой. При переводе в относительные единицы значение ЭДС в вольтах делят на номинальное фазное напряжение. Для МДС обмотки возбуждения за базовое значение принимают МДС,

соответствующую номинальному фазному напряжению $U_{ном.ф}$, и к ней относят остальные значения МДС.

За нормальную характеристику холостого хода для явнополюсных синхронных машин принимают характеристику со следующими данными (в относительных единицах):

E_*	0,58	1	1,21	1,33	1,44	1,46	1,51
F_{f0*}	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5

Расчетная и нормальная характеристики должны быть близки друг к другу, но их полное совпадение не является обязательным.

10.12. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МДС РЕАКЦИИ ЯКОРЯ

Для определения МДС обмотки возбуждения, необходимой для создания нужного потока при нагрузке, необходимо учитывать влияние реакции якоря. Амплитуда первой гармоники МДС реакции якоря при токе $I_ф$.

$$F_a = 0{,}45 m \frac{w_1 k_{об1}}{p} I_ф. \quad (10.90)$$

Для количественного учета влияния реакции якоря на магнитное поле машины обычно МДС F_a разлагают на две составляющие: продольную $F_d = F_a \sin\psi$, максимум которой совпадает с осью полюсов, и поперечную $F_q = F_a \cos\psi$, максимум которой совпадает с осью, проходящей через середину межполюсного пространства. Угол ψ является углом между током $I_ф$ и ЭДС E_0. Магнитодвижущие силы якоря и обмотки возбуждения имеют различное пространственное распределение, и поэтому одинаковые их значения создают различные потоки. Для удобства совместного рассмотрения одну из МДС необходимо привести к другой. Так как обычно при расчетах используется характеристика холостого хода, то целесообразно МДС якоря привести к прямоугольной МДС обмотки возбуждения. Для этого F_d и F_q заменяются эквивалентными МДС обмотки возбуждения F_{ad} и F_{aq}. Эквивалентные МДС F_{ad} и F_{aq} определяют исходя из того, чтобы потоки первой гармоники, создаваемые ими, были соответственно равны потокам первой гармоники от МДС F_d и F_q. При переходе от F_d и F_q к F_{ad} и F_{aq} вводят коэффициенты k_{ad} и k_{aq} [6].

$$\left. \begin{aligned} F_{ad} &= k_{ad} F_d; \\ F_{aq} &= k_{aq} F_q. \end{aligned} \right\} \quad (10.91)$$

Коэффициенты k_{ad} и k_{aq} зависят от отношений, $b_p / \tau = \alpha$ и δ / τ. Они могут быть найдены из рис. 10.24.

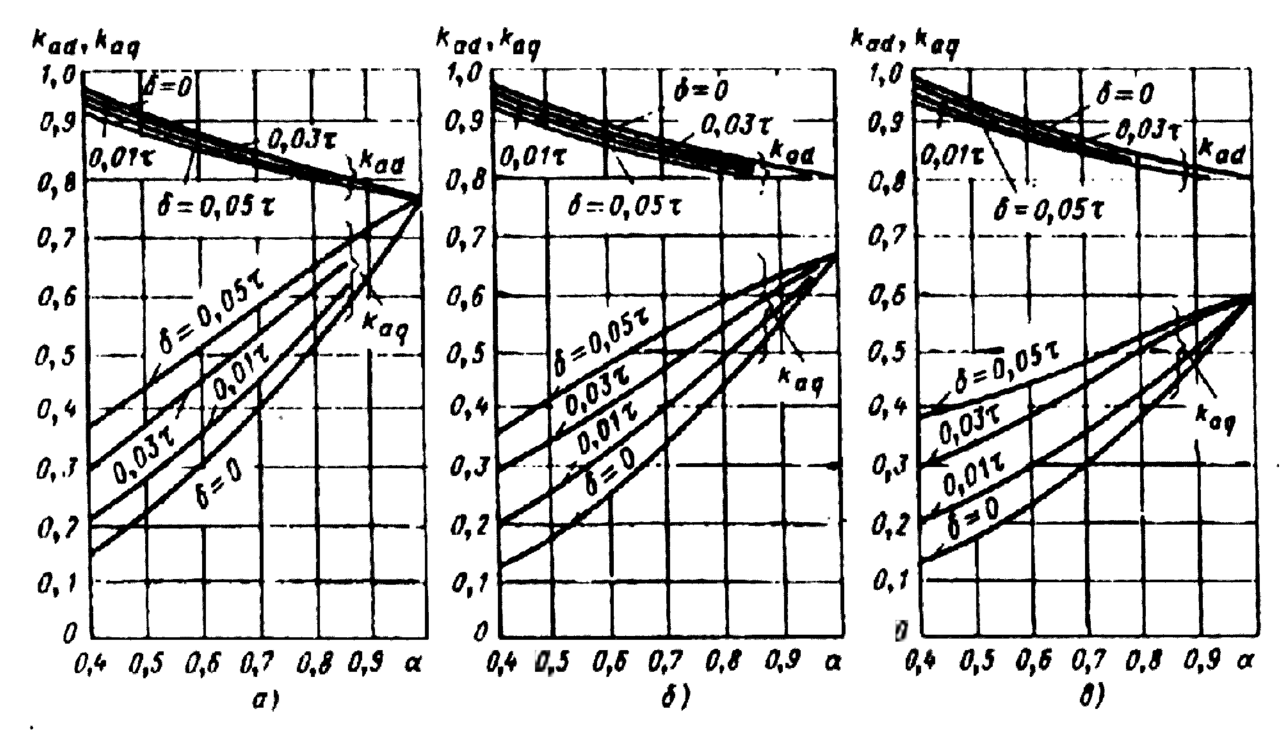


Рис. 10.24. Кривые для определения коэффициентов k_{ad} и k_{aq}:
а — при $S_m / \delta = 1$; *б* — при $S_m / \delta = 1{,}5$; *в* — $S_m / \delta = 2$

В ненасыщенной машине можно принимать, что продольное и поперечное поля существуют независимо и не оказывают взаимного влияния друг на друга. При наличии насыщения такое допущение может внести в расчет погрешности. Однако учет взаимного влияния продольного и поперечного потоков в насыщенной машине связан с большими трудностями и может быть сделан приближенно. На основе анализа магнитных полей в синхронных машинах при нагрузке и насыщении были определены коэффициенты k_d и k_q (рис. 10.25), на которые нужно умножить МДС F_{ad} и F_{aq}, чтобы получить соответствующие их значения $F_{ad} = k_d F_{ad}$ и $F_{aq} = k_q F_{aq}$ при учете насыщения. Эти коэффициенты получены в функции $F_{\delta Za} / F_\delta$, т. е. отношения суммы магнитных напряжений воздушного зазора, зубцов и спинки статора к магнитному напряжению воздушного зазора. Коэффициенты $\bar{k}_d$ и $\bar{k}_q$ получены для машин с равномерным воздушным зазором, а $\tilde{k}_d$ и $\tilde{k}_q$ — для машин, у которых зазор изменяется согласно уравнению

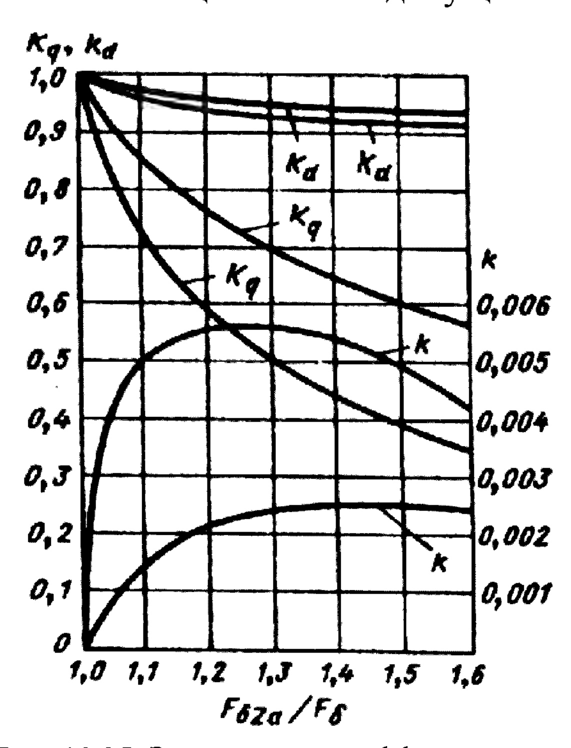


Рис. 10.25. Зависимость коэффициентов k_d, k_q и k от $F_{\delta Za} / F_\delta$

$$\delta_x = \frac{\delta}{\cos(x\pi / \tau)}, \quad (10.92)$$

где x — расстояние от оси полюса до рассматриваемой точки.

Коэффициенты $\tilde{k}_d$ и $\tilde{k}_q$ можно с некоторым приближением применить и для машин, у которых $\delta_m / \delta = 1{,}5$.

Как известно, поперечная реакция якоря вызывает ослабление поля под одним краем полюса и усиление его под другим. В ненасыщенной машине результирующий поток полюса при этом не изменяется. При насыщении магнитной цепи увеличение потока под одним из краев полюса происходит в меньшей мере, чем ослабление под другим, и результирующий поток (его первая гармоника) уменьшается. Для компенсации размагничивающего действия поперечной реакции якоря необходимо увеличивать МДС обмотки возбуждения на F_{qd}.

При равномерном воздушном зазоре F_{qd} можно определить по формуле

$$F_{qd} = \bar{k}\frac{b_p}{\delta}F_a\cos\psi = \bar{k}\frac{b_p}{\delta}F_q, \quad (10.93)$$

а при зазоре, изменяющемся по (10.92), — по формуле

$$F_{qd} = \tilde{k}\frac{\tau}{\delta}F_q. \quad (10.94)$$

На рис. 10.25 даны зависимости $\bar{k}$ и $\tilde{k}$ от отношения F_{dZa} / F_δ.

Количественный учет реакции якоря при определении МДС обмотки возбуждения производится с помощью векторных диаграмм (см. § 10.14) [6].

10.13. ПАРАМЕТРЫ ОБМОТКИ СТАТОРА ДЛЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ

При построении векторных диаграмм, а в дальнейшем и при расчете характеристик синхронных машин необходимо знать параметры обмотки статора.

Активное сопротивление обмотки статора, Ом,

$$r_1 = \frac{\rho_\vartheta w_1 l_{ср1}}{n_{эл} q_{эл} a}, \quad (10.95)$$

где ρ_ϑ — удельное сопротивление проводника обмотки; $n_{эл} q_{эл}$ — сечение эффективного проводника, м^2; $l_{ср1} = 2(l_1 + l_Л)$ — средняя длина витка обмотки статора; a — число параллельных ветвей.

Длину лобовой части $l_л$ определяют при жестких секциях по (9.139), а для всыпных обмоток — по (9.136).

Активное сопротивление фазы в относительных единицах

$$r_1^* = r_1 \frac{I_{ном.ф}}{U_{ном.ф}}. \quad (10.96)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы статора x_σ обусловлено полями рассеяния пазовой и лобовой частей обмотки, а также высшими гармониками поля в воздушном зазоре (дифференциальное рассеяние) и определяется по следующей формуле:

$$x_\sigma = 15{,}8\frac{f}{100}\left(\frac{w_1}{100}\right)^2\frac{l_\delta}{pq_1}(\lambda_{п.к}+\lambda_л+\lambda_Д), \tag{10.97}$$

где $\lambda_{п.к}, \lambda_л, \lambda_Д$ — коэффициенты удельной (на единицу длины) проводимости пазового, лобового и дифференциального рассеяния.

Коэффициент удельной проводимости паза $\lambda_{п.к}$ состоит из двух составляющих: пропорциональной проводимости между стенками паза $\lambda_п$ и проводимости по коронкам зубцов $\lambda_к$:

$$\lambda_{п.к} = \lambda_п + \lambda_к, \tag{10.98}$$

где $\lambda_п$ в зависимости от конфигурации паза определяют по табл. 9.26;

$$\lambda_к = \left[\alpha\lambda'_к + (0{,}22+0{,}32\sqrt{\frac{t_{Z1}-b_ш}{b_ш}})(1-\alpha)\right]k'_\beta, \tag{10.99}$$

где t_{Z1} — зубцовое деление статора; $b_ш$ — ширина шлица паза (при открытых пазах $b_ш = b_{п1}$); α — коэффициент полюсного перекрытия (из § 10.9); k'_β — по (9.156); $\lambda_к$ — по рис. 10.26 в зависимости от отношения $b_ш/(\delta' k_\delta)$.

При больших отношениях $b_ш/(\delta' k_\delta)$ проводимость $\lambda'_к$ становится отрицательной, что приводит к уменьшению $\lambda_{п.к}$. Это уменьшение связано с искривлением силовых линий поля рассеяния вблизи воздушного зазора по сравнению с прямолинейным законом их распределения, как это было принято при выводе формулы для $\lambda_п$.

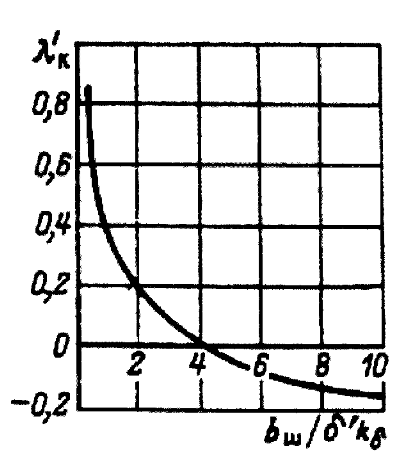


Рис. 10.26. Зависимость $\lambda'_к$ от отношения $b_ш/\delta' k_\delta$

Коэффициент проводимости лобового рассеяния определяют по (9.159).

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния приближенно определяют по формуле

$$\lambda_Д = 0{,}03\frac{\tau\alpha_\delta}{\delta' k_\delta q_1}. \tag{10.100}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния в относительных единицах

$$x_{\sigma*} = x_\sigma\frac{I_{ном.ф}}{U_{ном.ф}}. \tag{10.101}$$

Ненасыщенное значение индуктивного сопротивления продольной реакции якоря в относительных единицах

$$x_{ad*} = (k_{ad} F_{аном}) / (k_{\mu 0} F_{\delta 0}), \quad (10.102)$$

где $F_{аном}$ — МДС статора при номинальном токе по (10.90); $F_{\delta 0}$ — магнитное напряжение воздушного зазора при $E = U_{ном.ф}$; k_{ad} — по рис. 10.24; $k_{\mu 0} = F_{f0} / F_{\delta}$ — коэффициент, учитывающий влияние магнитных напряжений стали и зазора между полюсом и ярмом для ненасыщенной машины; он может быть найден из расчета магнитной цепи для точки, соответствующей $E = 0{,}5 U_{ном.ф}$.

Ненасыщенное значение индуктивного сопротивления поперечной реакции якоря в относительных единицах

$$x_{aq*} = \frac{k_{aq} F_{аном}}{k_{\mu 0} F_{\delta 0}} \frac{1 + k_{\delta}}{2}. \quad (10.103)$$

Коэффициент k_{aq} определяют по рис. 10.23; k_{δ} — коэффициент воздушного зазора — по (10.66).

Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси

$$x_{d*} = x_{ad*} + x_{\sigma *}. \quad (10.104)$$

Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси

$$x_{q*} = x_{aq*} + x_{\sigma *}. \quad (10.105)$$

10.14. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МДС ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПРИ НАГРУЗКЕ. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Для определения МДС обмотки возбуждения при нагрузке используют векторные диаграммы (рис. 10.27).

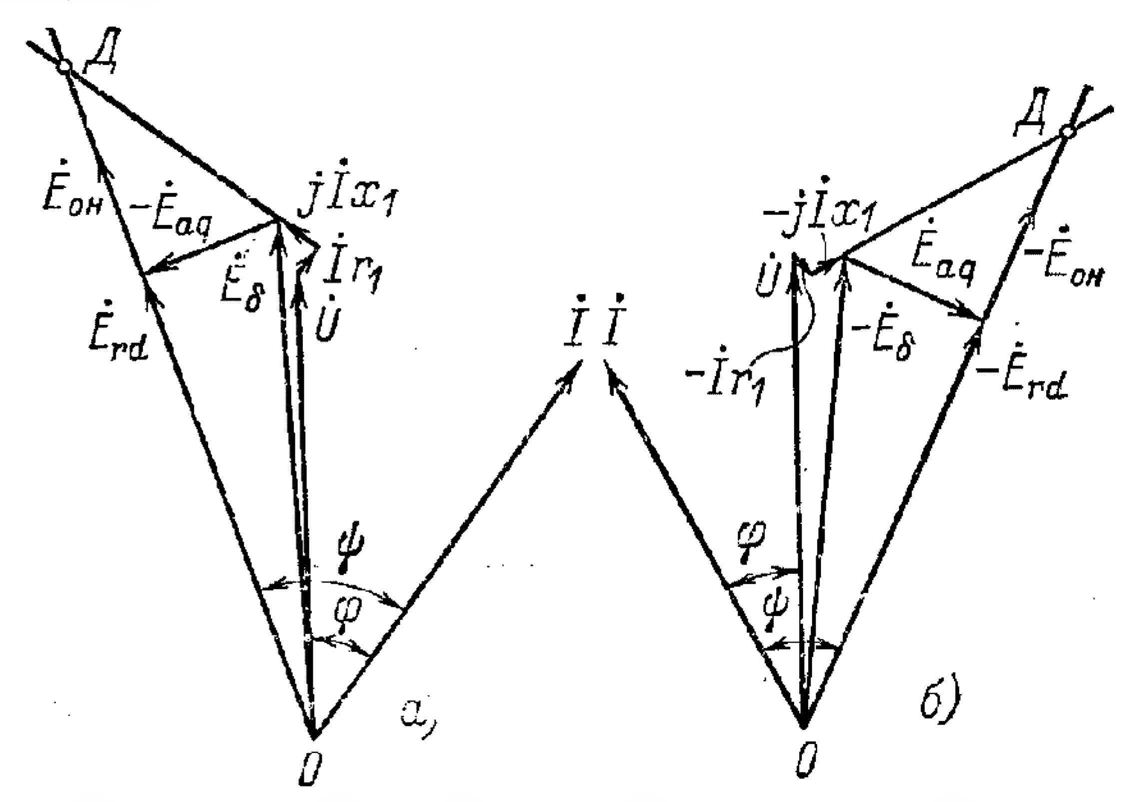


Рис. 10.27. векторные диаграммы: *а* — для генератора; *б* — для двигателя

Для их построения целесообразно использовать относительные значения параметров тока, напряжения, ЭДС и МДС.

Для более точного определения потока рассеяния полюсов при нагрузке необходимо иметь частичные характеристики намагничивания:

$$\hat{O}_* = \mathring{A}_* = f(F_{\delta Za*}),\ \Phi_{\sigma *} = f(F_{\delta Za*}),\ \hat{O}_{m*} = f(F_{mj*}).$$

Здесь принято $\Phi_* = \Phi / \Phi_\delta$, $\Phi_{\sigma *} = \Phi_\sigma / \Phi_\delta$, $\Phi_{m*} = \Phi_m / \Phi_\delta$; Φ_δ— базовое значение потока, равное потоку при номинальном фазном напряжении;

$$F_{\delta Za*} = \frac{F_{\delta Za}}{F_{j\delta}} = \frac{F_\delta + F_{Z1} + F_a + F_{Z2}}{F_{j\delta}};$$

$$F_{mj*} = \frac{F_{mj}}{F_{j\delta}} = \frac{F_m + F_{\delta mj} + F_j}{F_{j\delta}};$$

$$F_{f0*} = \frac{F_{f0}}{F_{f\delta}} = \frac{F_{\delta Za} + F_{mj}}{F_{f\delta}};$$

$F_{f\delta}$—базовое значение МДС, равное МДС обмотки возбуждения при холостом ходе и номинальном фазном напряжении. На рис. 10.28 все характеристики имеют одинаковые масштабы по соответствующим осям координат.

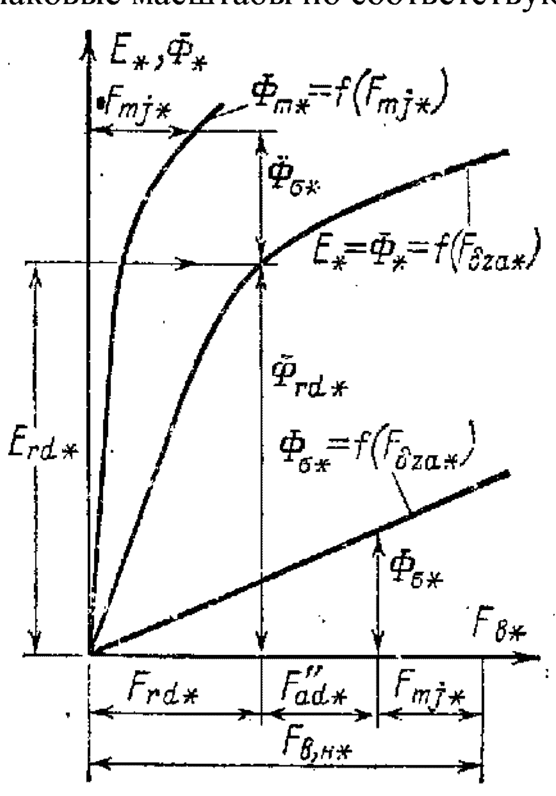


Рис. 10.28. Частичные характеристики намагничивания

Для оценки насыщения машины удобно построить зависимость $E_* = f(F_{\sigma Za} / F_\delta)$ (рис. 10.29). Указанные графики строятся по данным расчета магнитной цепи машины.

Диаграмма при заданных номинальных значениях тока $(I_{ном.ф*} = 1)$, напряжения $(U_{ном.ф*} = 1)$ и угла между ними строится следующим образом.

1. В выбранном масштабе для тока и напряжения откладывают вектор номинального фазного тока и под углом φ к нему— вектор фазного напряжения.

2. К вектору напряжения пристраивают векторы падения напряжения $\dot{I}_* r_{1*}$, $j\dot{I}_* x_{\sigma *}$, для генератора и $-\dot{I}_* r_{1*}$, $-j\dot{I}_* x_{\sigma *}$, для двигателя, в результате чего находят ЭДС $E_{\delta *}$, которая индуктируется в обмотке якоря

при нагрузке. При $I_* = 1$ векторы падения напряжения численно равны r_{1*} и $x_{\sigma*}$. В крупных машинах падение напряжения в активном сопротивлении r_{1*} относительно мало и им можно пренебречь.

3. По $E_{\delta*}$ из зависимости $E_* = f(F_{\delta Za} / F_\delta)$ определяют отношение $F_{\delta Za} / F_\delta$, по которому из рис. 10.25 находят коэффициенты k_q, k_d и k.

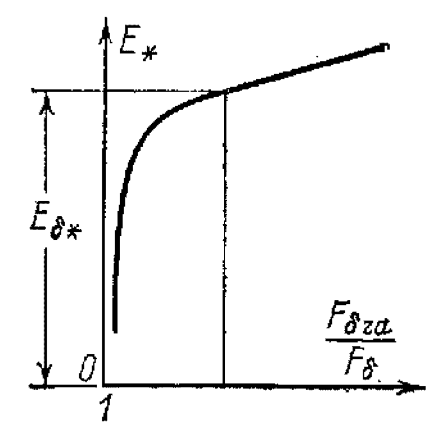


Рис. 10.29. Зависимость E от отношения $F_{\delta Za} / F_\delta$

4. Определяют значение результирующей ЭДС по продольной оси E_{rd} и угол ψ. Для этой цели находят МДС (в относительных единицах):

$$\frac{F'_{aq*}}{\cos\psi} = \frac{k_q k_{aq} F_a}{F_{f\delta}} = k_q k_{aq} F_{a*},$$

где

$$F_{a*} = \frac{0{,}45 m w_1 k_{об1} I_{ном.ф}}{p F_{f\delta}}.$$

Отложив F_{aq*} по оси абсцисс характеристики $E_* = f(F_{\delta Za*})$, на оси ординат получают ЭДС, равную $E_{aq*} / \cos\psi$ (см. рис. 10.28). Добавляя эту ЭДС к вектору $j\dot{I}_* x_\sigma$ (или $-j\dot{I}_* x_{\sigma*}$), получают точку $Д$ (см. рис. 10.27), через которую пройдет линия, совпадающая с направлением ЭДС $\dot{E}_{rd*}$ (или $-\dot{E}_{rd*}$). Угол между током $\dot{I}_*$ и этой линией является углом ψ.

5. Опустив перпендикуляр из конца вектора $j\dot{I} x_\sigma$ (или $-j\dot{I} x_\sigma$) на линию $0Д$, находят ЭДС E_{rd*}, наводимую в обмотке якоря результирующим потоком по продольной оси $E_{rd*} = \Phi_{rd*}$. Из характеристики $E_* = f(F_{\delta Za*})$ по E_{rd} определяют МДС F_{rd*} (см. рис. 10.28).

6. Определяют МДС продольной реакции якоря:

$$F''_{ad*} = F'_{ad*} + F_{qd*} = k_d k_{ad} F_{a*} \sin\psi + k\frac{\tau}{\delta} F_{a*} \cos\psi, \quad (k - \text{см. рис. } 10.25)$$

7. По сумме $F_{rd*} + F''_{ad*}$ по характеристике $\Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta Za*})$ определяют поток рассеяния полюса $\Phi_{\sigma*}$.

8. По потоку полюса $\Phi_{m*} = \Phi_{rd*} + \Phi_{\sigma*}$ из характеристики $\Phi_{m*} = f(F_{mj*})$ определяют сумму магнитных напряжений ротора F_{mj*}.

9. Находят МДС обмотки возбуждения при нагрузке в относительных единицах

$$F_{fном} = F_{rd*} + F''_{ad*} + F_{mj*}$$

и в физических единицах (амперах)

$$F_{f\text{ном}} = F_{f\text{ном}*}F_{f\delta}.$$

Из характеристики холостого хода $E_* = f(F_{f0*})$ по $F_{f\text{ном}*}$ определяют ЭДС $E_{0н*}$, наводимую в обмотке статора при холостом ходе, а затем находят изменение напряжения на выводах машины (для генератора):

$$\Delta U_* = E_{0н*} - 1.$$

10.15. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Обмотка возбуждения синхронных машин подключается к источнику постоянного тока. До недавнего времени для питания обмоток возбуждения применялись специальные генераторы постоянного тока — возбудители.

В настоящее время для возбуждения синхронных машин применяют статические устройства.

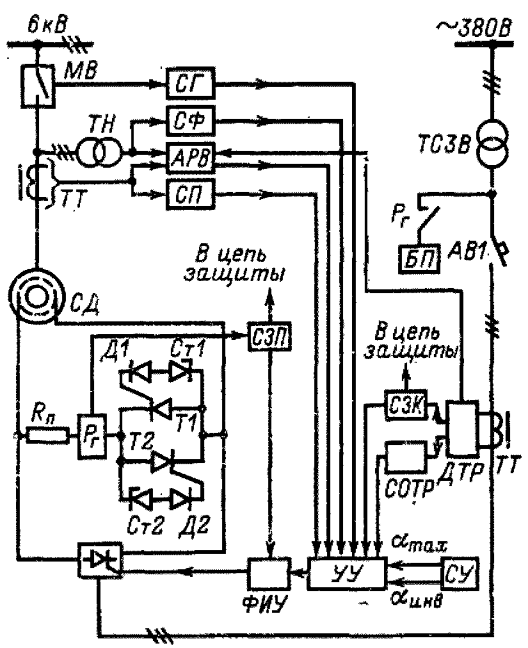


Рис. 10.30. Структурная схема тиристорного возбудителя синхронного двигателя (питание от сети 380 В):

СГ — схема гашения поля; *СФ* — схема форсировки возбуждения;

АРВ — автоматический регулятор возбуждения;

СП — схема пуска;

СЗП — схема защиты пускового сопротивления;

ФИУ — фазоимпульсное устройство;

УУ — устройство управления;

БП — блок питания; *СЗК* — схема защиты от коротких замыканий;

СОТР — схема ограничения тока ротора;

ДТР — датчик тока ротора;

СУ — схема установок угла регулирования;

К — герконное реле

Серии синхронных машин общего назначения 13—21-го габаритов (СД2, СГ2, СДН2 и т. д.) оснащены комплектными тиристорными возбудительными устройствами (ТВУ). Особенностью ТВУ является бесконтактное и быстродействующее управление током возбуждения во всех эксплуатационных режимах и наличие автоматического регулирования возбуждения. Это повышает надежность и улучшает использование машин. Кроме того, КПД тиристорных возбудительных устройств выше, чем генераторов постоянного тока.

На рис. 10.30 приведена структурная схема одного из применяемых в настоящее время ТВУ. В ТВУ питание обмотки возбуждения происходит через тиристорный преобразователь или от сети переменного тока с напряжением 380 В через согласующий трансформатор ТСЗВ, или от дополнительной трехфазной обмотки, расположенной на статоре. Преобразователи осуществляют выпрямление переменного тока в

постоянный и имеют трехфазную схему со средним выводом при выпрямленном напряжении до 100 В или трехфазную мостовую при напряжении выше 100 В. Параллельно обмотке возбуждения синхронного двигателя через тиристорный ключ подключен пусковой резистор.

Управление тиристорным преобразователем осуществляется фазоимпульсным устройством (ФИУ).

Функции управления и регулирования в ТВУ осуществляет электронная система управления, в комплект которой входит ряд блоков, показанных на рисунке.

В табл. 10.10 даны номинальные данные тиристорных возбудительных устройств серии ТВУ для синхронных двигателей.

Таблица 10.10. **Номинальные данные тиристорных возбудительных устройств**

Тип	Номинальные данные ТВУ				Пусковое сопротивление R_n, Ом
	I, А	U, В	P, кВт	U_{max}, В	
ТВУ-46-320	320	46	14,7	80	0,385
ТВУ-65-320	320	65	20,8	115	0,51
ТВУ-80-320	320	80	25,6	140	0,64
ТВУ-105-320	320	105	33,6	185	0,8
ТВУ-137-320	320	137	43,8	240	1,02
ТВУ-166-320	320	166	52	290	1,44
ТВУ-195-320	320	195	62	340	1,44
ТВУ-217-320	320	247	79	435	1,6

Кроме того, для синхронных машин 13-го и 14-го габаритов разработаны ТВУ с питанием от дополнительной обмотки статора. Выпрямленное напряжение этих устройств 25…36 В при токе 140…170 А.

Иногда для возбуждения синхронных машин применяют бесконтактные системы. В этом случае к обмотке возбуждения непосредственно (без контактных колец) подводят выпрямленное напряжение от машины переменного тока небольшой мощности (синхронной или асинхронной), якорь которой располагается на одном валу с синхронной машиной. Выпрямители закрепляют на роторе, и они вращаются вместе с ним.

При проектировании обмоток возбуждения для улучшения теплоотдачи и заполнения катушки медью стремятся увеличить сечение проводников обмотки и уменьшить число ее витков при соответствующем увеличении тока возбуждения.

В связи с этим напряжение для питания обмотки возбуждения выбирается низким и в некоторых случаях нестандартным. В качестве предварительных значений

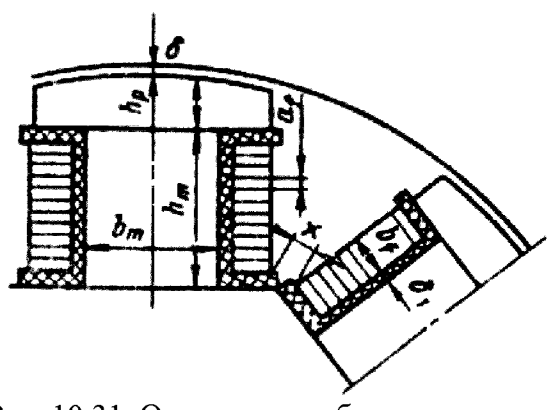


Рис. 10.31. Однорядные обмотки возбуждения синхронных машин

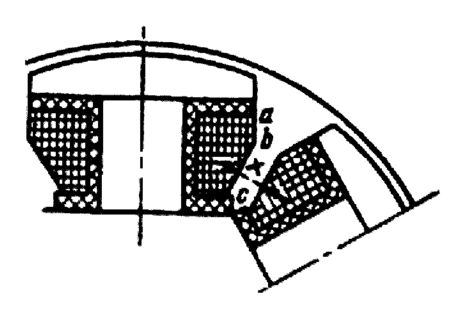


Рис. 10.32. Многорядные обмотки возбуждения

можно наметить следующую шкалу напряжений: 25, 35, 45, 65, 80, 100, 115, 160, 200, 230 В, которая, однако, не является строго обязательной, и в зависимости от конкретной схемы возбуждения напряжения могут иметь иные значения. Меньшие значения напряжения выбирают для машин небольшой мощности. Учитывая переходное падение напряжения $\Delta U_{щ}$ в контакте между щеткой и кольцом, напряжение на обмотке возбуждения ΔU_f следует принимать на 1—2 В меньшим, чем напряжение ТВУ.

Обмотки возбуждения выполняют однорядными (рис. 10.31) и многорядными (рис. 10.32). Многорядные катушки в сечении имеют скошенную форму.

Для синхронных машин мощностью от сотен киловатт и выше, как правило, применяют однорядные обмотки, которые выполняют из полосовой неизолированной меди сечением больше 30 мм^2, намотанной на ребро. Однорядные обмотки более надежны и вследствие лучшего охлаждения допускают большие плотности тока, чем многорядные.

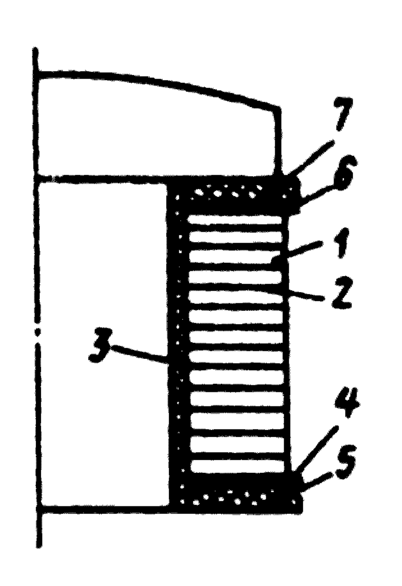


Рис. 10.33. Изоляция катушки однорядной обмотки возбуждения

Многорядные обмотки применяют для машин небольшой мощности.

Изоляция катушек однорядных обмоток возбуждения для машин мощностью свыше 100 кВт дана в табл. 10.11 в соответствии с рис. 10.33. В табл. 10.12 и на рис. 10.34 представлена изоляция многорядных обмоток для машин мощностью менее 100 кВт.

При расчете обмотки возбуждения ее МДС для запаса увеличивается на 10… 20% по сравнению со значением, полученным из векторной диаграммы для номинального режима:

$$F'_{fном} = (1{,}1...1{,}2)F_{fном}. \qquad (10.106)$$

Сечение проводника обмотки возбуждения q_f, м^2, предварительно определяют по формуле

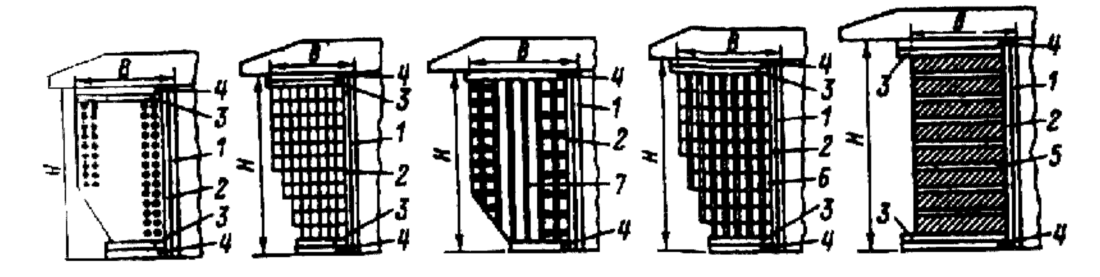


Рис. 10. 34. Изоляция многорядных катушек обмотки возбуждения

$$q_f = \frac{\rho_\vartheta 2pF_{fном} l_{fср}}{U_f}, \quad (10.107)$$

где ρ_ϑ - удельное сопротивление меди при рабочей температуре обмотки, Ом·м; для однослойной обмотки из неизолированной меди и изоляции класса нагревостойкости В ρ_{130}=1/39·10^6 Ом·м, для многослойных обмоток при изоляции класса нагревостойкости В ρ_{120}= 1/40 ·10^6 Ом·м; U_f— напряжение на обмотке возбуждения, В; $l_{fср}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения, м.

Таблица 10.11. **Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью свыше 100 кВт**

Позиция на рис. 10.33	Материал		Число слоев	Общая толщина мм	Примечание
	Наименование	Толщина мм			
1	Медь полосовая	—	—	—	—
2	Бумага асбестовая электроизоляционная	0,2	2	0,4	Для классов нагревостойкости А, Е, В применяется лакировка глифталебакелитовым лаком, для классов F и Н — лаком на кремнийорганической основе
3	Миканит формовочный (или микафолий, или стекломикафолий)	0,5 (0,2)	3	1,5 (1,6)	Для обмоток в тропическом и химически стойком исполнениях применять только стекломикафолий или формовочный миканит
4,6	Миканит прокладочный	0,5	1	0,5	Промежутки между шайбами и сердечником заполняются электроизоляционной замазкой
5	Стеклотекстолит	5	1	5	Для класса нагревостойкости А нормального исполнения вместо стеклотекстолита применяют гетинакс
7	«	8	1	8	

Таблица 10.12. **Изоляция катушек ротора явнополюсных синхронных машин мощностью до 100 кВт**

Позиция на рис. 10.34	Классы нагревостойкости А и В нормального исполнения			Классы нагревостойкости А и В усиленного влагостойкого исполнения			Классы нагревостойкости F и H всех исполнений и класс нагревостойкости В химически стойкого и тропического исполнений		
	Наименование материала	Толщина, мм	Число слоев	Наименование материала	Толщина, мм	Число слоев	Наименование материала	Толщина, мм	Число слоев
1	Слюдинотофолий	0,12	16	Микафолий (или формовочный миканит)	0,2 (0,5)	8 (3)	Стекломикафолий (или миканит формовочный)	0,2 (0,5)	8 (2)
2	Бумага телефонная лакированная	0,07	3	Бумага телефонная лакированная	0,07	3	Лента стеклянная	0,1	1 слой встык
3	Миканит прокладочный	0,5	1	Миканит прокладочный	0,5	1	Миканит прокладочный	0,5	1
4	Гетинакс	3—5	1	Гетинакс	3—5	1	Стеклотекстолит	3—5	1
5	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 между витками	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 между витками	Бумага асбестовая, дополнительно лакированная	0,3	1 слой между витками
6	Слюдинит гибкий	0,2	1	Миканит гибкий	0,2	1 между слоями	Стекломиканит гибкий	0,22	1 слой между слоями
7	Бумага конденсаторная	0,03	1	Стеклянная ткань	0,025	То же	Стеклянная ткань	0,025	То же

Примечание. Материалы (миканиты, стекломикафолий, стеклотекстолит) должны иметь связующие, соответствующие выбранному классу изоляции.

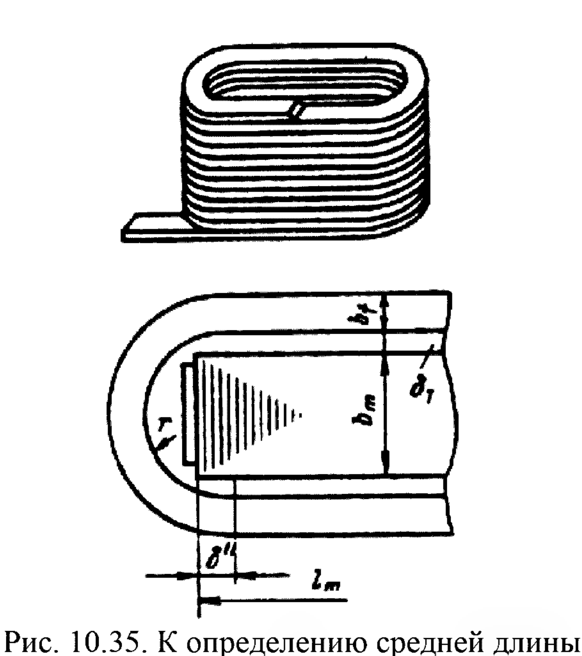


Рис. 10.35. К определению средней длины витка
однорядных обмоток с лобовой частью в виде полуокружности

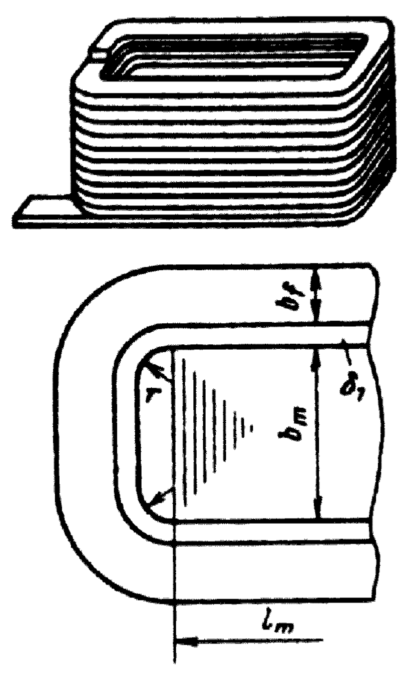


Рис. 10.36. Лобовая часть с двумя закруглениями

Предварительно средняя длина витка, м, может быть принята равной:
для многорядных обмоток

$$l_{fcp} = 2(l_m + b_m + 4\delta_1) + \pi b_{K.T}, \qquad (10.108)$$

для однорядных:
а) с лобовой частью в виде полуокружности (рис. 10.35)

$$l_{fcp} = 2(l_m - 2\delta'') + \pi(b_m + 2\delta_1 + b_f); \qquad (10.109)$$

б) с лобовой частью в виде прямолинейного участка с двумя закруглениями (рис. 10.36); применяют при b_m 20 см:

$$l_{fcp} = 2(l_m + b_m - 2r) + \pi(2r + 2\delta_1 + b_f). \qquad (10.110)$$

В (10.108)—(10.110) δ_1— односторонняя толщина изоляции полюса $\delta_1 \approx (1{,}5\ldots2{,}0)\cdot 10^{-3}$, м; δ_1 можно также выбрать по табл. 10.11 и 10.12; δ''— расстояние от центра закругления с радиусом r до края штампованной части полюса:

b_m, м	δ'', м
До 0,06	0,01
0,06—0,1	0,0125
0,1—0,12	0,015
0,12—0,15	0,02
0,15—0,2	0,03

r— радиус закругления, м: $r \approx b_f$; $b_{K.T}$— толщина катушки обмотки возбуждения, м; b_f— ширина проводника обмотки, м.

Предварительно, пока не известны размеры катушки обмотки и размеры проводника, можно принять:

для многорядных обмоток $b_{K.T} \approx 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ м при $D \leq 0{,}3$ м и $b_{K.T} \approx 5 \cdot 10^{-2}$ м при $D > 0{,}3$ м;

для однорядных обмоток $b_f \approx (0{,}05...0{,}1)\tau$.

Напряжение U_f может быть задано или его следует выбрать. При выборе напряжения, подводимого к обмотке возбуждения, необходимо учитывать некоторые особенности, связанные с выполнением и охлаждением обмотки. Для машин мощностью до 100 кВт, в которых применяют многорядные обмотки, напряжение возбуждения следует выбрать таким, чтобы получить сечение прямоугольных проводников возможно большим, но не выше 30…40 мм^2. Для малых машин при сечении проводника меньше 2,5 мм^2 применяют круглые провода.

В крупных машинах (при $P_{ном}$ >100 кВт), для которых следует применять однорядные обмотки, сечение прямоугольных проводников должно быть больше 30…40 мм^2, но не выше 300 мм^2. По конструктивным и технологическим требованиям отношение сторон проводника должно быть не больше 10—15. Намотку обмотки ведут на ребро. Допустимая плотность тока в проводниках обмотки зависит от класса нагревостойкости изоляции и условий охлаждения. В современных синхронных машинах изоляция обмоток возбуждения имеет класс нагревостойкости В или F.

Однорядные обмотки выполняют из неизолированной прямоугольной меди. Изоляция витков состоит из двух слоев асбестовой бумаги общей толщиной после опрессовки 0,3 мм, приклеенной лаком к широкой стороне проводника.

Для многорядных обмоток при меняют изолированные проводники с изоляцией класса нагревостойкости В или F, например, марки ПСД.

Предварительно значения плотности тока, А/м^2 , в проводниках обмотки возбуждения J_f можно выбрать в следующих пределах:

Для однорядных обмоток крупных машин	$(3.5 — 5{,}3) \cdot 10^6$
Для многорядных обмоток	$(3.2 — 3{,}8) \cdot 10^6$

Меньшие значения плотности тока выбирают для машин, имеющих большую длину.

Ток возбуждения

$$I_{fном} = q_f J_f \,. \tag{10.111}$$

Определив ток возбуждения, найдем число витков в катушке полюса обмотки возбуждения:

$$w_f = F_{fном} / I_{fном} \quad . \tag{10.112}$$

В некоторых случаях, когда задается ток возбуждения $I_{fном}$, витки обмотки могут быть определены по (10.112), исходя из МДС $F_{fном}$. Поперечное сечение проводников обмотки по выбранной плотности тока определяют как

$$q_f = I_{fном} / J_f . \tag{10.113}$$

Для многорядных обмоток по найденному сечению проводника (по табл. П3.3) определяют его размеры $a_f \times b_f$. Отношение сторон проводников b_f / a_f должно находиться в пределах 1,5—2.

Проведя раскладку проводников по слоям, вычерчивают масштабный эскиз, по которому определяют размеры катушки. Намотку можно производить как на широкую, так и на узкую стороны проводника.

Размеры проводников при этом берутся с учетом изоляции для выбранной марки провода (по табл. П3.4).

Для возможности размещения катушек на полюсах, а также для прохождения охлаждающего воздуха между катушками соседних полюсов в нижней их части должно быть предусмотрено расстояние не менее 0,7…1,0 см (расстояние x на рис. 10.32).

Для однорядных обмоток меньший размер прямоугольного проводника определяют, исходя из найденного числа витков и выбранной ранее высоты полюсного сердечника h_m:

$$a_f = \frac{h_m - \delta_{к.п}}{w_f + 1} - \delta_п , \tag{10.114}$$

где $\delta_п$ — изоляция между витками: $\delta_п \approx 0{,}3 \cdot 10^{\ 3}$ м; $\delta_{к.п}$ — суммарная толщина изоляции обмотки от полюсного наконечника и ярма ротора: для машин $P_{ном} < 100$ кВт $\delta_{к.п} = (7...10) \cdot 10^{\ 3}$ м; для машин $P_{ном} > 100$ кВт $\delta_{к.п} = (10...15) \cdot 10^{\ 3}$ м (большие значения принимают для крупных машин).

По сечению q_f определяют возможные размеры широкой части провода, м:

$$b_f = q_f / a_f . \tag{10.115}$$

Далее по табл. П3.6 выбирают близкие к найденным размеры стандартной прямоугольной меди $a_f \times b_f$ и q_f, затем проверяют размещение обмотки на полюсе. Если обмотка не размещается на полюсе, то следует или несколько изменить размеры проводника, или изменить высоту полюса. После того как определились размеры проводника обмотки возбуждения, необходимо проверить расстояние между катушками соседних полюсов (расстояние x на рис. 10.31 и 10.32):

$$x \approx \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_p - 2h_m)}{2p} - b_m - 2\delta_1 - 2b_f . \tag{10.116}$$

Это расстояние должно быть не менее 7 мм.

Для проверки нагрева обмотки возбуждения уточняют плотность тока

$$J_f = I_{fном} / q_f \qquad (10.117)$$

и определяют превышение температуры, ^{0}С, по нижеприведенным формулам.

Для многорядных обмоток

$$\Delta\vartheta_f = \frac{(2{,}8 + \frac{l_1}{\tau})F_{fном}J_f}{76 \cdot 10^8\, П_f(1{,}6 + \sqrt{V_p})}\left[1 + \frac{\delta_{nf}(m - 0{,}5)(1{,}6 + \sqrt{V_p}) \cdot 10^2}{2{,}8 + \frac{l_1}{\tau}}\right], \qquad (10.118)$$

где δ_{nf} — двусторонняя изоляция проводников, м; m — число слоев в наиболее широкой части катушки; $П_f$ — периметр боковой части катушки, м (abc на рис. 10.32); V_p — окружная скорость вращения ротора, м/с.

Для однорядных катушек

$$\Delta\vartheta_f = \frac{3 \cdot 10^{\ 10}(2{,}8 + \frac{l_1}{\tau})b_f J_f^2}{1{,}6 + \sqrt{V_p}}. \qquad (10.119)$$

Согласно ГОСТ 183—74 допустимое превышение температуры для многорядных обмоток равно 80^0 С при изоляции класса нагревостойкости В и 100^0 С при изоляции класса нагревостойкости F. Для однорядных обмоток с оголенными поверхностями допустимые превышения температуры соответственно равны 90 и 110^0 С.

При расчете машины допустимое превышение температуры следует принимать на 10…15^0 С меньше по сравнению с рекомендованной ГОСТ.

Если превышение температуры получится больше или, наоборот, много меньше допустимого, то необходимо произвести пересчет обмотки возбуждения, что может потребоваться и в том случае, если расстояние x будет мало.

При пересчете можно попытаться изменить значения некоторых из рекомендуемых ниже величин: плотности тока в обмотках, соотношения между сторонами прямоугольного проводника, высоты и в небольших пределах (3…6%) ширины полюсного сердечника, сечения проводника за счет изменения напряжения, подводимого к обмотке возбуждения, воздушного зазора.

После того как окончательно установлены размеры обмотки возбуждения, уточняют размеры полюса, среднюю длину витка по (10.108)—(10.110) и ток возбуждения $I_{fном}$.

Определяют сопротивление обмотки возбуждения:

$$r_f = \rho_\vartheta \frac{2pw_f l_{fcp}}{q_f}. \qquad (10.120)$$

Значение $\rho_э$ см. в табл. 5.1.

Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при номинальной нагрузке и температуре 130^0 С (или 120^0 С для многорядных обмоток)

$$U'_{fном} = r_{f130} I_{fн}. \qquad (10.121)$$

Коэффициент запаса возбуждения (находится в пределах 1,1—1,2)

$$k_f = U_{fн} / (U'_{fном} + \Delta U_{щ}), \qquad (10.122)$$

где $U'_{fном}$ — номинальное напряжение ТВУ.

10.16. ПАРАМЕТРЫ И ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ

Параметрами машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток. В § 10.13 определены некоторые параметры обмотки статора. Здесь даются расчетные формулы для нахождения параметров роторных обмоток и параметров обмотки якоря, которые необходимы для расчетов переходных и несимметричных режимов работы машины. Приведенные ниже формулы дают значения параметров в относительных единицах. Параметры цепей ротора приведены ук числу витков обмотки якоря.

Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения

$$x_{f*} = 1{,}27 k_{ad} x_{ad*} \left(1 + \frac{4 k_{\mu 0} F_{\delta 0} l'_m \sum \lambda}{\Phi_\delta}\right), \qquad (10.123)$$

где l'_m — расчетная длина сердечника полюса, м, по (10.52); $F_{\delta 0}$ и Φ_δ — магнитное напряжение воздушного зазора и поток при $E = U_{ном.ф}$;

$$\sum \lambda = \lambda_{pl} + \lambda_{ml} / 1{,}53 + \lambda_{mb} / 2{,}65;$$

$\lambda_{pl}, \lambda_{ml}, \lambda_{mb}$ определяют по (10.81)—(10.83).

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения

$$x_{\sigma f*} = x_{f*} - x_{ad*}. \qquad (10.124)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния демпферной (пусковой) обмотки по продольной оси

$$x_{kd*} = 7{,}9 \frac{F_{аном}}{\Phi_\sigma} \frac{10^{6}}{1 - k_b} \left[\frac{l_p}{N_c} (\lambda_b + \lambda_{Д.У}) + \lambda_{Rd} \right]; \qquad (10.125)$$

по поперечной оси

$$x_{kq*} = 7{,}9 \frac{F_{аном}}{\Phi_\sigma} \frac{10^{6}}{1 + k_b} \left[\frac{l_p}{N_c} (\lambda_b + \lambda_{Д.У}) + \lambda_{Rq} \right]. \qquad (10.126)$$

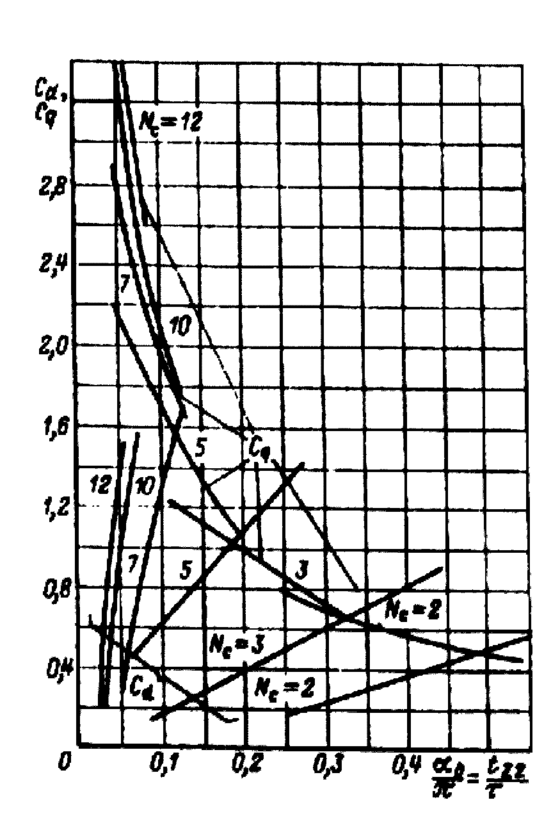


Рис. 10.37. Коэффициенты приведения C_d и C_q для расчета проводимости короткозамыкающих колец

Здесь l_p — длина полюсного наконечника, м; $F_{аном}$ — МДС статора при номинальном токе; N_c — число стержней на полюс; λ_b — коэффициент проводимости пазового рассеяния. При круглых полуоткрытых пазах (см. рис. 10.20)

$$\lambda_b = (0{,}785 - \frac{b_s}{2d_s}) + \frac{h_s}{d_s};$$

$\lambda_{Д.У}$ — коэффициент проводимости дифференциального рассеяния: $\lambda_{Д.У} = t_{Z2}/(12\delta' k_\delta)$; $\lambda_{Rd}, \lambda_{Rq}$ — коэффициенты проводимости короткозамыкающих колец по продольной и поперечной осям: $\lambda_{Rd} = 0{,}19\tau C_d / N_c; \lambda_{Rq} = 0{,}19\tau C_q / N_c$; коэффициенты приведения C_d и C_q находят по рис. 10.37; k_b — коэффициент распределения демпферной (пусковой) обмотки:

$$k_b = \frac{\sin N_c \alpha_b}{N_c \sin \alpha_b}; \qquad \alpha_b = \pi t_{Z2} / \tau .$$

Значения k_b можно найти также по рис. 10.38.

Формулы (10.125) и (10.126) получены для наиболее часто применяемого случая

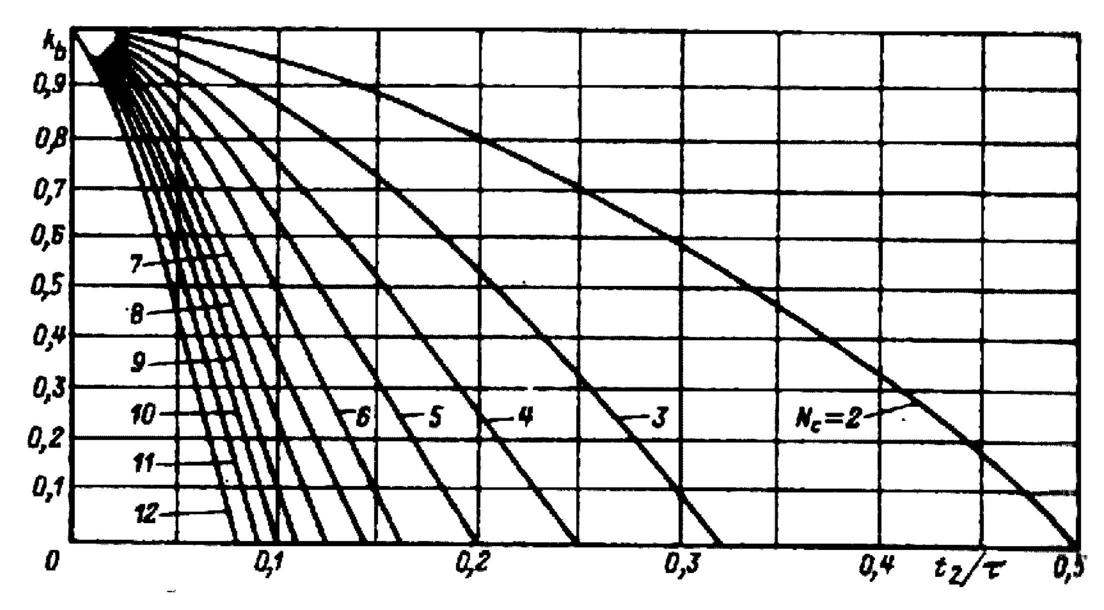


Рис. 10.38. Коэффициенты распределения для успокоительной (пусковой) обмотки

равномерного распределения стержней на полюсном наконечнике и полной (продольно-поперечной) демпферной (пусковой) обмотки.

При неполной обмотке (продольной) x_{kd*} определяют по (10.125), а

$$x_{kq*} \approx (3-4)x_{kd*}. \qquad (10.127)$$

Индуктивное сопротивление нулевой последовательности для двухслойных обмоток, Ом,

$$x_0 = \frac{2{,}18 l_1 F_{аном} \cdot 10^{6}}{\Phi_\delta q_1 k_y^2}\left[(\beta - 0{,}555)\frac{h_{п1}}{b_{п1}} + (3\beta - 2)\frac{h_4}{b_{п1}}\right] + 0{,}355\frac{F_{аном}(3\beta-2)}{F_{\delta 0}k_y^2}\times$$
$$\times\left[(\frac{1}{3q_1})^2 + 0{,}39(\beta - \frac{2}{3}) - (\beta - \frac{2}{3})^2 + \frac{1}{27}\right], \qquad (10.128)$$

где $\beta = y_1 / 3q_1$ — укорочение шага обмотки статора; k_y — коэффициент укорочения шага обмотки статора для первой гармоники — по (10.39); $h_{п1}, b_{п1}$ — высота и ширина паза статора; h_4 — высота верхней части паза, не занятой обмоткой; q_1 — число пазов на полюс и фазу обмотки статора.

При отсутствии демпферной (пусковой) клетки перед вторым членом коэффициент 0,355 необходимо заменить на 0,71.

Переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси

$$x'_{d*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{ad*}x_{\sigma f*}}{x_{ad*} + x_{\sigma f}}; \qquad (10.129)$$

по поперечной

$$x'_{q*} = x_{q*}. \qquad (10.130)$$

Сверхпереходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси

$$x''_{d*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{kd*}(x'_{d*} - x_{\sigma*})}{x_{kd*} + x'_{d*} - x_{\sigma*}}; \qquad (10.131)$$

по поперечной оси

$$x''_{q*} = x_{\sigma*} + \frac{x_{aq*}x_{kq*}}{x_{aq*} + x_{kq*}}. \qquad (10.132)$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора обратной последовательности при работе машины на большое внешнее реактивное сопротивление

$$x_{2*} = (x''_{d*} + x''_{q*})/2; \qquad (10.133)$$

при работе машины на малое внешнее сопротивление (короткое замыкание)

$$x_{2*} = \sqrt{x''_{d*} x''_{q*}} \,. \qquad (10.134)$$

Активное сопротивление обмотки возбуждения

$$r_{f*} = \frac{0{,}44 F_{аном} k_{ad}^2 l_{fcp}}{10^8 \varPhi_\delta f w_1 q_f} \,. \qquad (10.135)$$

Активное сопротивление демпферной (пусковой) клетки при равномерном распределении стержней из однородного материала

по продольной оси

$$r_{kd*} = \frac{2{,}16}{10^8 f} \frac{F_{аном}}{\varPhi_\delta} \frac{1}{1 - k_B} \left[\frac{c_c l_c}{q_c N_c} - \frac{c_{к.з} \tau C_d}{q_{к.з} N_c} \right]; \qquad (10.136)$$

по поперечной оси

$$r_{kq*} = \frac{2{,}16}{10^8 f} \frac{F_{аном}}{\varPhi_\delta} \frac{1}{1 + k_B} \left[\frac{c_c l_c}{q_c N_c} - \frac{c_{к.з} \tau C_q}{q_{к.з} N_c} \right]; \qquad (10.137)$$

где l_c — длина стержня, м, по (10.61); C_d и C_q — коэффициенты приведения (по рис. 10.37); c_c и $c_{к.з}$ — отношение удельных сопротивлений материала стержня и кольца к удельному сопротивлению меди (для меди эти коэффициенты равны 1, для латуни 4, для фосфористой бронзы 6,5).

При применении стержней из разнородного материала приближенно сопротивление демпферной (пусковой) обмотки можно найти по (10.136) и (10.137), заменив в них первый член в скобках выражением

$$\frac{c'_c c''_c l_c}{(c''_c N'_c + c'_c N''_c) q_c} \,, \qquad (10.138)$$

где N'_c — число стержней на полюс с относительным удельным сопротивлением c'_c; N''_c — число стержней на полюс с относительным удельным сопротивлением c''_c.

Постоянная времени представляет собой отношение индуктивности данной обмотки к ее сопротивлению. От постоянной времени зависит продолжительность протекания переходных процессов в синхронной машине.

Постоянная времени, с, обмотки возбуждения при разомкнутых обмотках статора и демпферной (пусковой)

$$T_{d0} = x_{f*} / (\omega r_{f*}) \,, \qquad (10.139)$$

где $\omega = 2\pi f$.

Постоянная времени, с, обмотки возбуждения при замкнутой обмотке статора, с,

$$T'_d = T_{d0} \frac{x'_{d*}}{x_{d*}} \,. \qquad (10.140)$$

Постоянные времени демпферной (пусковой) обмотки, с, при разомкнутых обмотках статора и возбуждения:

по продольной оси

$$T_{kd0} = (x_{ad*} + x_{kd*})/(\omega r_{kd*})\,; \qquad (10.141)$$

по поперечной оси

$$T_{kq0} = (x_{aq*} + x_{kq*})/(\omega r_{kq*})\,. \qquad (10.142)$$

Постоянные времени демпферной (пусковой) обмотки по продольной оси, с, при замкнутой накоротко обмотке возбуждения и разомкнутой обмотке статора

$$T''_{kdf} = \frac{x_{kd*}x_{\sigma f*} + x_{ad*}x_{kd*} + x_{\sigma f*}x_{ad*}}{\omega r_{kd*}(x_{\sigma f*} + x_{ad*})}\,. \qquad (10.143)$$

Постоянная времени демпферной (пусковой) обмотки по продольной оси, с, при замкнутых накоротко обмотке возбуждения и обмотке статора

$$T''_{kd} = T''_{kdf}\,\frac{x''_{d*}}{x'_{d*}}\,. \qquad (10.144)$$

Постоянная времени демпферной (пусковой) обмотки по поперечной оси полюсов, с, при замкнутой накоротко обмотке статора

$$T''_{kq} = \frac{x''_{q*}}{x'_{q*}}\,T_{kq0}\,. \qquad (10.145)$$

Постоянная времени обмотки статора, с, при короткозамкнутых обмотках ротора

$$T_a = x_{2*}/(\omega r_{1*})\,. \qquad (10.146)$$

Пределы изменения параметров и постоянных времени для синхронных машин общего назначения даны в табл. 10.13 и 10.14.

Таблица 10.13. **Параметры явнополюсных синхронных генераторов и двигателей в относительных единицах**

Схема	$x_{\sigma*}$	r_{1*}	x_{d*}	x_{q*}	
С демпферной (пусковой) обмоткой	0,1—0,2	0,008—0,02	1—2,4	0,6—1,6	
Без демпферной (пусковой) обмотки	0,1—0,2	0,08—0,02	1—2,4	0,6—1,6	
Схема	x'_{d*}	x''_{d*}	x''_{q*}	x_{2*}	x_{0*}
С демпферной (пусковой) обмоткой	0,2—0,6	0,15—0,3	0,15—0,4	0,15—0,35	0,02—0,2
Без демпферной (пусковой) обмотки	0,2—0,6	—	—	0,3—0,8	0,04—0,25

Таблица 10.14. **Постоянные времени явнополюсных синхронных генераторов и двигателей**

Схема	T_{d0}, с	T'_d, с	T''_{kd}, с	T_a, с
С демпферной (пусковой) обмоткой	2—10	0,8—2,5	0,01—0,08	0,03—0,35
Без демпферной (пусковой) обмотки	2—10	0,8—2,5	—	0,1—0,5

10.17. МАССА АКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Для оценки массогабаритных параметров спроектированной машины, для расчета потерь и т. п. возникает необходимость в определении массы активных материалов. В дальнейшем, после разработки конструкции, может быть определена масса конструкционных материалов, а затем и масса всей машины.

При определении массы активных материалов необходимые для расчета размеры берут (в метрах) из параграфов, указанных в скобках, или из соответствующих формул.

Масса зубцов статора, кг,

$$m_{Z1} = 7800 l_{ст1} k_c k_{п1} b_{Z1_2} Z_1, \tag{10.147}$$

где

$$b_{Z1_2} = \frac{\pi(D + h_{п1})}{Z_1} - b_{п1},$$

$l_{ст1}$ — по (10.10); $h_{п1}$ — по (10.28); $b_{п1}$ — по (10.27) или по эскизу паза.

Масса ярма магнитопровода статора, кг,

$$m_{a1} = 7800 l_{ст1} k_c \pi (D_a - h_a) h_a, \tag{10.148}$$

где h_a — по (10.32)

Масса меди обмотки статора, кг,

$$m_{M1} = 8900 q_{эф} u_п Z_1 l_{ср1} / 2, \tag{10.149}$$

здесь $q_{эф}$ — по (10.29); $u_п$ — по (10.15) или (10.19); $l_{ср1}$ — см. в § 10.13.

Масса меди обмотки возбуждения, кг (см. § 10.15),

$$m_{Mf} = 8900 q_f l_{fср} 2 p w_f. \tag{10.150}$$

Масса меди стержней демпферной (пусковой) обмотки, кг (см. § 10.10),

$$m_{M.C} = 8900 q_c \cdot 2 p N_c l_c. \tag{10.151}$$

Масса меди короткозамыкающих колец, кг (см. § 10.10),

$$m_{M.к.з} = 8900 q_{к.з} (D - 2\delta - 2h_s - 2d_s) 2\pi. \tag{10.152}$$

Масса стали полюсов, кг (см. § 10.9):

$$m_m = 7800 l_m k_{cp} \cdot 2p(h_m l_m + 0{,}8 h_p b_p). \qquad (10.153)$$

Масса стали обода ротора, кг (см. § 10.9):

$$m_j = 7800 l_j \pi (D - 2\delta - 2h_{mp} - h_j) h_j, \qquad (10.154)$$

где h_{mp} — по (10.79); для h_j берут уточненные значения, полученные из механического расчета.

По этим данным можно найти общие затраты меди и активной стали в машине.

Полная масса меди

$$m_M = m_{M1} + m_{Mf} + m_{M.C} + m_{M.к.з}. \qquad (10.155)$$

Полная масса активной стали

$$m_{ct} = m_{Z1} + m_{a1} + m_m + m_j. \qquad (10.156)$$

Разделив (10.155) и (10.156) на полную номинальную мощность $S_{ном}$, находят массу активных материалов на единицу мощности:

$$q_M = m_M / S_{ном}; \qquad (10.157)$$

$$q_{ct} = m_{ct} / S_{ном}. \qquad (10.158)$$

10.18. ПОТЕРИ И КПД

Потери в синхронной машине можно разделить на основные и добавочные. Ниже приводится расчет этих потерь для номинального режима работы.

Основные потери. Основные электрические потери в обмотке статора, кВт,

$$P_{э1} = m I^2_{ном.ф} r_1 \cdot 10^{-3}. \qquad (10.159)$$

Потери на возбуждение, кВт, при наличии возбудителя, сочлененного с валом машины, согласно ГОСТ определяют с учетом потерь в возбудителе:

$$P_f = \frac{I^2_{fно} r_f + 2\Delta U_щ I_{fно}}{\eta_f} 10^{-3}.$$

(10.160)

Для машин, возбуждаемых от отдельно установленных устройств,

$$P_f = (I^2_{fном} r_f + 2\Delta U_щ I_{fном}) 10^{-3}, \qquad (10.161)$$

где $I_{ном.ф}, I_{fном}$ — номинальные значения тока якоря и тока возбуждения;

$\Delta U_щ$ — переходное падение напряжения в щеточном контакте ($\Delta U_щ$ = 1 В);

η_f — КПД возбудителя (η_f = 0,8…0,85).

Сопротивления обмоток r_1 и r_f определяют по (10.95) и (10.120) соответственно и приводят к расчетной температуре, равной 75^0 С для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости А, Е, В или 115^0 С для обмоток с изоляцией классов нагревостойкости F и Н.

Магнитные потери в ярме магнитопровода статора, кВт,

$$P_{a1} = k_{Да} p_{a1\ 50} B_a^2 (f/50)^{1,3} m_{a1} \cdot 10^{\ 3}. \qquad (10.162)$$

Магнитные потери в зубцах магнитопровода статора, кВт,

$$P_{Z1} = k_{ДZ} p_{Z1\ 50} B_{Z1\ 3}^2 (f/50)^{1,3} m_{Z1}. \qquad (10.163)$$

где $p_{a1\ 50}$ и $p_{Z1\ 50}$— удельные потери при индукции 1 Тл и частоте 50 Гц, которые следует взять из табл. П1.17 для соответствующей марки стали; $k_{Да}$ и $k_{ДZ}$— коэффициенты, учитывающие увеличение потерь из-за частичного замыкания листов вследствие наличия заусенцев, а также изменения структуры стали при штамповке: при $P_{ном} \leq$ 100 кВт $k_{Да}$ =1,5; $k_{ДZ}$=2; при $P_{ном}$ > 100 кВт $k_{Да}$ =1,3; $k_{ДZ}$=1,7; B_a и $B_{Z1\ 3}$ — индукция в ярме статора и зубце статора на 1/3 высоты зубца при $E = U_{ном.ф} (E_* = 1$, см. расчет характеристики холостого хода).

Механические потери, равные сумме потерь в подшипниках и на вентиляцию, кВт,

$$P_{мех} \approx 3,68 p (v_p / 40)^3 \sqrt{l_1}, \qquad (10.164)$$

где v_p— окружная скорость ротора, м/с; l_1— полная длина статора, м.

Добавочные потери. Добавочные потери возникают в машине как при холостом ходе, так и при нагрузке. При холостом ходе возникают потери на поверхности полюсных наконечников, кВт, из-за колебания индукции вследствие зубчатого строения статора:

$$P_{пов} = 0,5 \cdot 2 p \alpha \tau l_1 k_0 \left\langle \frac{Z_1 n}{10000} \right\rangle^{1,5} \left(B_0 t_{Z1} \cdot 10^3\right)^2 \cdot 10^{\ 3}, \qquad (10.165)$$

где $B_0 = B_{\delta 0}(k_{\delta 1} - 1)$; $B_{\delta 0}$— индукция при $E = U_{ном.ф}$, Тл; $k_{\delta 1}$— коэффициент воздушного зазора; k_0— коэффициент: k_0= 4,6 при полюсах из листов толщиной 1 мм и k_0= 8,6 при полюсах из листов толщиной 2 мм, при массивных полюсных наконечниках k_0= 23,3; α— коэффициент полюсного перекрытия; Z_1 — число зубцов статора (l_1, τ и t_1 подставляются в метрах).

Добавочные потери при нагрузке $P_{ДОБ}$ появляются в обмотках статора из-за вихревых токов и в стали как в статоре, так и в полюсных наконечниках ротора от высших гармонических магнитного поля якоря.

Приближенно полные добавочные потери при нагрузке можно определить в процентах полезной мощности для генераторов и подводимой мощности для двигателей:

Для машин до 1000 кВ·А	0,5
Для машин более 1000 кВ·А	0,25—0,4

Общие потери при номинальной нагрузке

$$\sum P = P_{э1} + P_f + P_{a1} + P_{Z1} + P_{мех} + P_{пов} + P_{ДОБ}. \quad (10.166)$$

Коэффициент полезного действия генератора

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_{ном} + \sum P}, \quad (10.167)$$

двигателя

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_{1ном}}, \quad (10.168)$$

где $P_{ном} = mU_{ном.ф} I_{ном.ф} \cos\varphi$ — номинальная активная мощность генератора, кВт; $P_{1ном}$ — активная мощность, подводимая к двигателю при номинальной нагрузке, кВт: $P_{1ном} = mU_{ном.ф} I_{ном.ф} \cos\varphi$.

10.19. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА ДЛЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ

Для оценки теплового состояния обмотки статора можно воспользоваться методикой упрощения расчета, применяемого в заводской практике для нормальных синхронных машин защищенного исполнения. Эта методика базируется на следующих допущениях. Принимается, что все потери, выделяемые в пределах активной длины статора, отводятся с его цилиндрической охлаждаемой поверхности, а потери в лобовых частях обмотки — с охлаждаемой поверхности этих частей.

При этих допущениях определяется отдельно превышение температуры части обмотки, находящейся в пределах активной длины стали, и превышение температуры лобовых частей по длине этой части.

Среднее превышение температуры всей обмотки находят как среднеарифметическое значение превышений, отнесенное к 1 м длины полувитка обмотки. Ниже приводятся расчетные формулы.

1. Перепад температуры в изоляции обмотки статора определяют по (10.33).

2. Удельный тепловой поток q_c на единицу цилиндрической внутренней поверхности статора, Вт/м^2,

$$q_c = \frac{\left(P_{Э1} \frac{l_1}{l_{ср\frac{1}{2}}} + P_{ДОБ} + P_{a1} + P_{Z1}\right) \cdot 10^3}{\pi D l_1}, \quad (10.169)$$

где P_{a1} и P_{Z1} — потери в стали спинки и зубцов статора при холостом ходе, Вт; D и l_1 — внутренний диаметр и длина статора, м; $l_{ср\frac{1}{2}}$ — средняя длина полувитка обмотки статора, м.

Искомое превышение температуры охлаждаемой поверхности статора относительно температуры окружающего воздуха находят так:

$$\Delta\vartheta_{пов.с} = q_c / \left[\alpha(1 + 0{,}1v_p)\right], \qquad (10.170)$$

где значения коэффициента теплоотдачи α в зависимости от отношения длины статора l_1 к полюсному делению τ могут быть приняты равными:

α= 80 Вт/(^{0} С·м^2) при $l_1/\tau \le 2$;

α= 66 Вт/(^{0} С·м^2) при $2 < l_1/\tau \le 4$;

α= 80 Вт/(^{0} С·м^2) при $4 < l_1/\tau \le 5$;

v_p — окружная скорость ротора, м/с.

3. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха. Так как лобовые части обмотки обычно образуют своеобразную решетку, продуваемую воздухом, то они охлаждаются почти по всему периметру поперечного сечения каждой якорной секции. Соответственно этому плотность теплового потока на единицу охлаждаемой поверхности лобовых частей, Вт/м^2, равна:

$$q_л = \rho_\vartheta A J_1 t_{Z1} / \Pi_1, \qquad (10.171)$$

где t_{Z1} — зубцовое деление статора, м; Π_1 — периметр поперечного сечения паза статора, м; A — линейная нагрузка, А/м; J_1 — плотность тока в статоре, А/м^2; ρ_ϑ — удельное сопротивление при температуре ϑ.

Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей статора, ^{0}С,

$$\Delta\vartheta_л = q_л / 13{,}3(1 + 0{,}07v_p), \qquad (10.172)$$

где v_p — окружная скорость ротора при радиальной вентиляции или вентилятора при аксиальной вентиляции, м/с.

4. Превышение температуры обмотки статора. Среднее значение превышения температуры обмотки статора, ^{0}С,

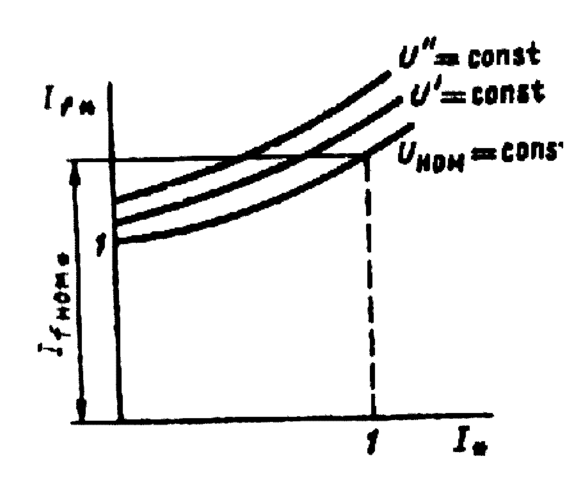
$$\Delta\vartheta_{об.с} = \frac{(\Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_{пов.с})l_1 + (\Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_л)l_л}{l_1 + l_л}, \qquad (10.173)$$

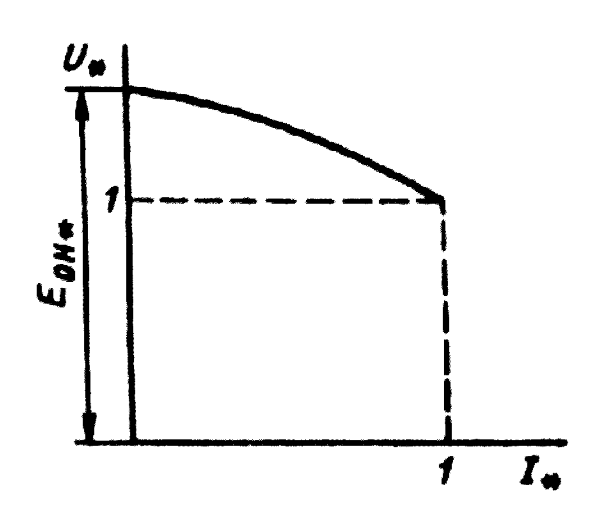
где l_1 — полная длина статора, м; $l_л = (l_{ср\,1}\,{}_2 - l_1)$ — длина лобовой части обмотки статора, м.

10.20. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ МАШИН

10.20.1. Основные характеристики

Рабочие свойства машины определяются ее характеристиками. Для генераторов основными характеристиками являются внешняя, регулировочная, U-образная и угловая, для двигателей — рабочие, U–образная и угловая. Для построения всех





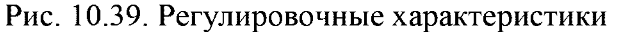


Рис. 10.39. Регулировочные характеристики

Рис. 10.40. Внешняя характеристика

указанных характеристик используют векторные диаграммы [6].

Регулировочная характеристика генератора представляет собой зависимость $I_{f*} = f(I_*)$ при U_*=const и $\cos\varphi$=const (рис. 10.39). Для построения этой характеристики задают ряд значений тока якоря I_* в пределах от 0 до 1 и при одних и тех же значениях U_* и $\cos\varphi$ строят векторные диаграммы, из которых находят ток возбуждения. Ток возбуждения при I_*=0 определяют из характеристики холостого хода по заданному напряжению. Для регулировочной характеристики при U_*=1=const и $\cos\varphi=\cos\varphi_{ном}$=const ток возбуждения, соответствующий номинальному току якоря, можно определить по векторной диаграмме, построенной раньше для нахождения МДС обмотки возбуждения (см. § 10.14). Эта МДС в относительных единицах равна току возбуждения $I_{fном*}$.

Внешняя характеристика $U_* = f(I_*)$ при $I_{fном*}$=const и $\cos\varphi_{ном}$=const (рис. 10.40) определяет зависимость напряжения генератора от его нагрузки. Исходная точка этой характеристики имеет координаты U_* =1 и I_*=1. При токе I_*=0 напряжение $U_*=E_{0н*}$ берут из векторной диаграммы, построенной для номинального режима машины. Промежуточные точки характеристики можно найти, построив ряд регулировочных характеристик при различных значениях напряжения $U_ф$. Напряжения U_*, при которых строят регулировочные характеристики, берут в пределах от E_{0*} до 1, а $\cos\varphi=\cos\varphi_{ном}$. Точки пересечения регулировочных характеристик с прямой, проведенной параллельно оси абсцисс, при $I_{f*} = I_{fном}$ дают искомые точки внешней характеристики.

U-образные характеристики $I_* = f(I_{f*})$ при $P_1 = mU_ф I_ф \cos\varphi = const$ (рис. 10.41) можно получить путем построения ряда векторных диаграмм при U=1=const и $I_* \cos\varphi$=const (рис. 10.42). Из построенных векторных диаграмм для каждого значения тока I_* определяют ток возбуждения I_{f*}.

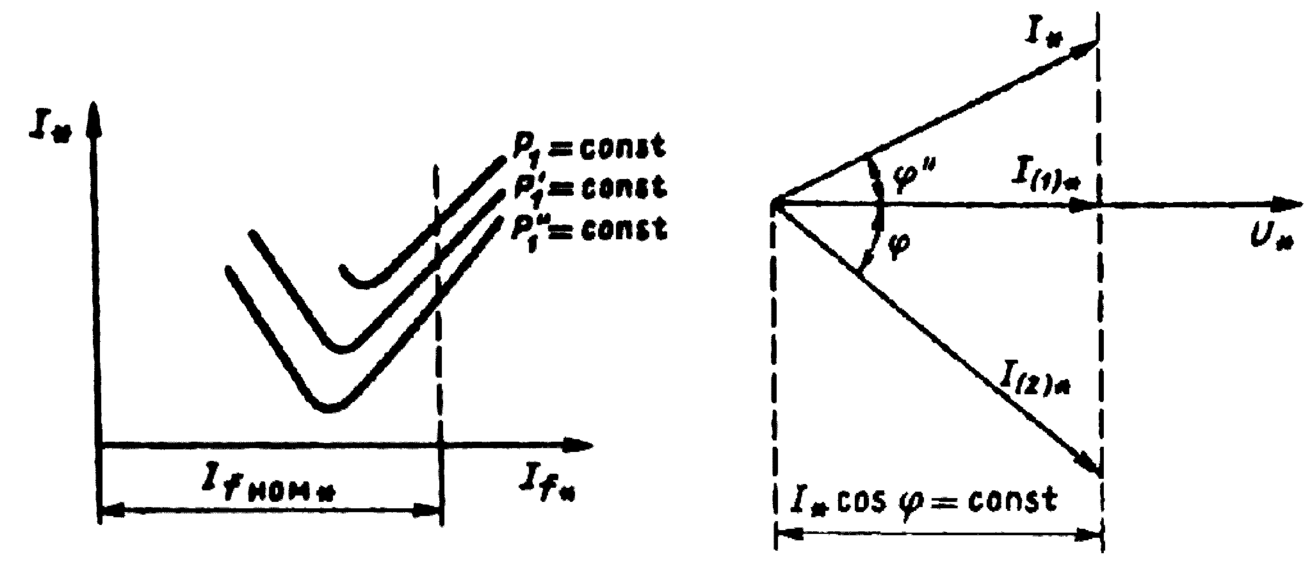


Рис. 10.41. U-образные характеристики Рис. 10.42. К построению U- образных характеристик

Угловые характеристики дают зависимость активной мощности от θ (угла нагрузки): $P_1 \approx P = f(\theta)$ при $U_* = 1$ и E_{0*}=const. Угол θ является углом между осями полюсов и результирующего магнитного поля или между векторами ЭДС $\dot{E}_{0н*}$ и напряжения $\dot{U}_*$. Построение угловых характеристик с учетом насыщения машины связано с большими трудностями. Ниже приведен расчет этой характеристики без учета насыщения. Параметры в этом случае принимают постоянными, равными их значению для ненасыщенной машины, а $r_1 = 0$.

Характеристику при $U_* = 1$ в относительных единицах строят по уравнению

$$P_{1*} = \frac{E'_{0*}}{x_{d*}} \sin\theta + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{x_{q*}} - \frac{1}{x_{d*}}\right)\sin 2\theta . \tag{10.174}$$

Электродвижущую силу E'_{0*} определяют по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода при токе возбуждения $I_{fном.*}$. При построении характеристики $P_* = f(\theta)$ угол θ изменяется в пределах от 0 до π.

По угловой характеристике определяют статическую перегружаемость машины, равную отношению $P_{\max} / P_{ном}$. Номинальная мощность $P_{ном}$ в относительных единицах равна $\cos\varphi_{ном}$. Если пренебречь активным сопротивлением (что возможно для машин средней и большой мощности), то можно принять

$$P_{\max} / P_{ном} = M_{\max} / M_{ном} , \tag{10.175}$$

где $M_{\max}$ и $M_{ном}$ — максимальный и номинальный моменты.

Статическую перегружаемость можно также рассчитать по формуле

$$\frac{P_{\max}}{P_{ном}} = \frac{M_{\max}}{M_{ном}} = \frac{E_{0*}}{x_{d*} \cos\varphi_{ном}} k_{p.c} . \tag{10.176}$$

Коэффициент $k_{р.с}$ учитывает реактивные составляющие мощности и момента, обусловленные неодинаковыми индуктивными сопротивлениями x_d и x_q. Он принимается по рис. 10.43 в зависимости от отношения $(x_{d*} - x_{q*})/(E'_{0*} x_{q*})$.

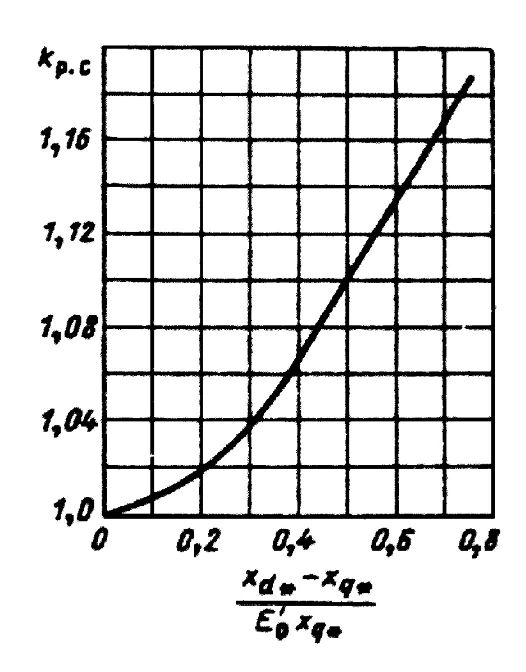


Рис. 10.43. К определению коэффициента $k_{р.с}$

Как уже отмечалось ранее, статическая перегружаемость синхронных двигателей общего назначения должна быть не ниже 1,65.

Для синхронных двигателей U-образные и угловые характеристики строят так же, как и для генераторов, с использованием соответствующих векторных диаграмм.

Рабочие характеристики двигателей, т. е. зависимости P_{1*}, I_{1*}, $\cos\varphi$, η, $M_* = f(P_{2*})$, при U_*=1=const и $I_{fном*}$=const могут быть получены по U-образным характеристикам. Для этого необходимо построить несколько U-образных характеристик при различных значениях P_{1*}=const и U_*=1=const. По этим характеристикам при $I_{f*} = I_{fном}$ находят ток I при данном значении мощности P_{1*} и $cos\varphi = P_1/(mU_{ном.ф}I)$. Затем определяют мощность на валу: $P_2 = P_1 - \sum P$ ($\sum P$— потери в машине для данного режима работы), $\eta = P_2 / P_1, M = P_2 / \Omega_1 (\Omega_1 = 2\pi n_{ном} / 60)$.

10.20.2. Токи короткого замыкания

При расчете механических усилий, воздействующих на лобовые части обмотки статора и на их бандажи, исходят из наибольшего мгновенного значения тока трехфазного короткого замыкания на выводах машины при данном значении возбуждения. Этот ток называется ударным током короткого замыкания.

Согласно ГОСТ 183 синхронная машина должна выдерживать ударный ток короткого замыкания при напряжении холостого хода, равном 105% номинального:

$$I_{уД*} = \frac{I_{уД}}{\sqrt{2} I_{ном.ф}} = 1{,}8 \frac{1{,}05}{x''_{d*}}. \qquad (10.177)$$

Коэффициент 1,8 учитывает затухание апериодической составляющей тока короткого замыкания.

Для машин без демпферной обмотки в (10.177) вместо x''_{d*} следует подставить x'_{d*}.

Практический интерес представляют кратности установившихся токов короткого замыкания. Под этим понимают отношение установившегося тока короткого замыкания к номинальному току обмотки якоря.

Кратность при возбуждении холостого хода, т. е. при возбуждении, которое при номинальной частоте вращения и разомкнутой обмотке якоря дает на выводах машины номинальное напряжение, обозначают ОКЗ (отношение короткого замыкания):

$$\text{ОКЗ} = I_{k0*} = E_{0н*} / x_{d*}, \tag{10.178}$$

где $E_{0н*}$ — ЭДС, определяемая по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода при I_{f*}=1.

Кратность при номинальном токе возбуждения

$$I_{k.н*} = E_{0*} / x_d. \tag{10.179}$$

10.20.3. Пусковые характеристики

Основным методом пуска синхронных двигателей в настоящее время является асинхронный пуск. Для этого в полюсах ротора размещается пусковая обмотка по типу короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя.

Оценку пусковых свойств двигателя производят по пусковым характеристикам, т. е. зависимостям тока в статоре и момента от скольжения $I_*, M_* = f(s)$. Наибольший интерес на этих характеристиках представляют величины, соответствующие s=1: начальный пусковой ток $I_{П*}$ и начальный пусковой момент $M_{П*}$, а также момент при скольжении s=0,05 — входной момент в синхронизм M_{BX}.

При расчете пусковых характеристик необходимо учитывать, что в отличие от ротора обычного асинхронного двигателя ротор синхронного явнополюсного двигателя имеет магнитную и электрическую несимметрии. Если условно подразделить пусковую обмотку на две части, то можно принять, что по продольной оси машины на роторе располагаются две обмотки, одной из которых является обмотка возбуждения, а другой — часть пусковой обмотки, представляющая ее эффект по продольной оси. По поперечной оси на роторе имеется только пусковая обмотка, представляющая ее эффект по поперечной оси. Необходимо также учитывать, что обмотка статора по продольной и поперечной осям имеет неодинаковые индуктивные сопротивления $x_d \neq x_q$.

На основании сказанного полное сопротивление по продольной оси машины, которое зависит от скольжения s, будет равно:

$$Z_{ds} = jx_\sigma + \cfrac{1}{\cfrac{1}{jx_{ad}} + \cfrac{1}{\cfrac{r'_f}{s} + jx_{\sigma f}} + \cfrac{1}{\cfrac{r_{kd}}{s} + jx_{kd}}}, \qquad (10.180)$$

где $r'_f \approx (10...12) r_f$, [r_f — по (10.135)].

Полное сопротивление по поперечной оси

$$Z_{qs} = jx_\sigma + \cfrac{1}{\cfrac{1}{jx_{aq}} + \cfrac{1}{\cfrac{r_{kq}}{s} + jx_{kq}}}. \qquad (10.181)$$

В приведенных формулах значения всех параметров принимают в относительных единицах (здесь и далее звездочка в обозначениях величин в относительных единицах опускается).

Вследствие магнитной и электрической несимметрий машины в статоре кроме тока I' основной частоты f_1 протекают токи I'' частоты $2s-1$. Значения их могут быть найдены по следующим формулам:

ток якоря частоты f_1

$$\dot{I}'_1 = \frac{U\left(Z_{ds} + Z_{qs} + \dfrac{2r_1}{2s-1}\right)}{(Z_{ds} + r_1)\left(Z_{qs} + \dfrac{r_1}{2s-1}\right) + (Z_{qs} + r_1)\left(Z_{ds} + \dfrac{r_1}{2s-1}\right)}; \qquad (10.182)$$

ток якоря частоты $2s-1$

$$\dot{I}''_1 = \frac{U(Z_{qs} - Z_{ds})}{(Z_{ds} + r_1)\left(Z_{qs} + \dfrac{r_1}{2s-1}\right) + (Z_{qs} + r_1)\left(Z_{ds} + \dfrac{r_1}{2s-1}\right)}; \qquad (10.183)$$

действующее значение тока статора

$$I_1 = \sqrt{I'^2_1 + I''^2_1}; \qquad (10.184)$$

момент вращения

$$M = \left(UI'_{1a} - I'^2_1 r_1 + I''^2_1 \frac{r_1}{2s-1}\right)\frac{1}{\cos\varphi_{ном}}, \qquad (10.185)$$

где I'_{1a} — активная составляющая тока I'_1.

Последний член выражения в скобках соответствует моменту, создаваемому током I''_1. При скольжениях $s > 0{,}5$ этот момент положительный, а при $s < 0{,}5$ — отрицательный, в результате чего в кривой $M = f(s)$ могут наблюдаться провалы. Из-за наличия провалов в кривой момента при разгоне двигатель может застрять на промежуточной скорости и не войти в синхронизм. Обычно для уменьшения

провала в кривой момента обмотку ротора замыкают на добавочный резистор с сопротивлением, примерно в 10 раз большим сопротивления самой обмотки.

В этом случае при определении Z_{ds} и Z_{qs}, как уже указывалось, сопротивление r'_f принимается равным (10-12) r_f.

Расчет по приведенным формулам связан с большой вычислительной работой. Его можно упростить, если у машин средней и большой мощности пренебречь активным сопротивлением r_1. Тогда получим

$$\dot{I}'_1 = \frac{\dot{U}(Z_{qs} + Z_{ds})}{2Z_{qs}Z_{ds}};$$

$$\dot{I}''_1 = \frac{\dot{U}(Z_{qs} - Z_{ds})}{2Z_{qs}Z_{ds}}; \qquad (10.186)$$

$$M = UI'_{1a}\frac{1}{\cos\varphi_{ном}}. \qquad (10.187)$$

Погрешность такого расчета по сравнению с расчетом по (10.177) — (10.180) не превышает 4%.

Для построения пусковых характеристик задают ряд значений скольжения s в пределах от 1 до 0,05 и для каждого его значения определяют ток I_1 и M. Иногда можно ограничиться расчетом начального пускового и входного моментов и начального пускового тока.

Промышленность выпускает двигатели со следующими значениями:

$$M_{Ï} = 0{,}8...1{,}3; \quad M_{ÂÕ*} = 0{,}9...1{,}9; I_{Ï*} = 4{,}5...6{,}5.$$

Пример расчета трехфазного синхронного двигателя

Проектное задание:

1. Номинальная мощность $P_{ном} = 500$ кВт.
2. Номинальное напряжение (линейное) $U_{ном} = 6000$ В.
3. Номинальная частота вращения $n_{ном} = 500$ об/мин.
4. Частота $f = 50$ Гц.
5. $\cos\varphi_{ном} = 0{,}9$ (опережающий).
6. Кратность максимального момента $M_{\max*} = 2{,}2$.

Режим работы — продолжительный. Конструкция — защищенная (IP11) с горизонтальным валом.

Номинальные величины

1. Номинальное фазное напряжение (предполагается, что обмотка статора соединена в звезду)
$U_{ном.ф} = U_{ном}/\sqrt{3} = 6000/\sqrt{3} = 3468$ В.
2. Номинальная полная мощность
$$S_{ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}\cos\varphi_{ном}} = \frac{500\cdot10^3}{0{,}937\cdot0{,}9} = 593\cdot10^3 \text{ В·А}$$
(по табл. 10.3, исходя из номинальных данных машины, определяем $\eta_{ном} = 0{,}937$).

3. Номинальный фазный ток

$$I_{ном.ф} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{593 \cdot 10^3}{\sqrt{3}6000} = 57{,}1 \text{ А.}$$

4. Число пар полюсов

$p = 60f / n_{ном} = 60 \cdot 50 / 500 = 6$.

5. расчетная мощность

$S' = k_E S_{ном} = 1{,}05 \cdot 593 \cdot 10^3 = 623 \cdot 10^3$ В·А.

Размеры статора

6. По рис. 10.8 для $S' = 623$ кВ·А при $p = 6$ предварительно находим внутренний диаметр статора $D = 0{,}9$ м.

7. Внешний диаметр статора по (10.3)

$D_a = K_D D = (1{,}28...1{,}33)0{,}9 = 1{,}15...1{,}2$ м.

По табл. 10.7 ближайший нормализованный внешний диаметр статора $D_a = 1{,}18$ м (16-й габарит). Высота оси вращения $h = 0{,}63$ м.

Поскольку найденный диаметр D_a лежит в пределах, задаваемых коэффициентом K_D, то пересчет диаметра не производим.

8. Полюсное деление по (10.4)

$\tau = \pi D/(2p) = 3{,}14 \cdot 0{,}9 / 12 = 0{,}236$ м.

9. Расчетная длина статора. По рис. 10.9. для $\tau = 0{,}236$ при $p = 6$ находим $A = 440 \cdot 10^2$ А/м, $B_{\delta ном} = 0{,}89$ Тл. Задаемся $\alpha_\delta = 0{,}66; k_B = 1{,}15; \alpha_\delta k_B = 0{,}76; k_{об1} = 0{,}92$. По (10.5) определяем расчетную длину статора:

$$l_\delta = \frac{6{,}1 S'}{\alpha_\delta k_B k_{об1} A B_{\delta ном} D^2 n_{ном}} = \frac{6{,}1 \cdot 623 \cdot 10^3}{0{,}76 \cdot 0{,}92 \cdot 44000 \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}9^2 \cdot 500} = 0{,}342 \text{ м.}$$

10. Находим λ по (10.6):

$\lambda = l_\delta / \tau = 0{,}342 / 0{,}236 = 1{,}45$.

По рис. 10.11 устанавливаем, что найденное значение λ при $p = 6$ лежит в допустимых пределах, ограниченных кривыми.

11. Действительная длина статора по (10.7)

$l_1 = 1{,}05 \cdot 0{,}342 = 0{,}36$ м.

12. Число вентиляционных каналов по (10.8) при $b_k = 0{,}01$ м.

$$n_k = \frac{l_1 - l_{пак}}{l_{пак} + b_k} = \frac{0{,}36 - (0{,}04...0{,}05)}{(0{,}04...0{,}05) + 0{,}01} = 6{,}4 - 5{,}17.$$

Принимаем $n_k = 6$.

13. Длина пакета по (10.9)

$$l_{пак} = \frac{l_1 - n_k b_k}{n_k + 1} = \frac{0{,}36 - 6 \cdot 0{,}01}{6 + 1} = 0{,}043 \text{ м.}$$

14. Суммарная длина пакетов магнитопровода по (10.10)

$l_{c1} = l_{пак}(n_k + 1) = 0{,}043(6 + 1) = 0{,}301$ м.

Зубцовая зона статора. Сегментировка

15. Число параллельных ветвей обмотки статора.

Так как $I_{ном.ф} = 57{,}1 < 200$ А, то выбираем $a = 1$.

16. По рис. 10.13 (кривая *2*) для $\tau = 0{,}236$ м находим $t_{Z1\min} = 0{,}031$ м; $t_{Z1\max} = 0{,}035$ м.

17. Максимальное число пазов (зубцов) магнитопровода статора

$Z_{1\max} = \pi D / t_{Z1\max} = \pi \cdot 0{,}9 / 0{,}031 \approx 91$.

18. минимальное число пазов (зубцов) магнитопровода статора

$Z_{1\min} = \pi D / t_{Z1\max} = \pi \cdot 0{,}9 / 0{,}035 \approx 81$.

19. Число пазов магнитопровода статора.

Так как $D_a > 990$ мм, то магнитопровод статора выполняется сегментированным. В диапазоне пазов $Z_{1\max}...Z_{1\min}$ требованиям п. 1—4 § 10.6 удовлетворяет числа пазов $Z_1 = 81$.

При этом

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{81}{2 \cdot 6 \cdot 3} = 2\,{}^1\!/_4; \qquad t_{Z1} = \frac{\pi D}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 0{,}9}{81} = 0{,}035 \text{ м}$$

и

$$Z_1 = 90 \qquad (q_1 = 2\,{}^1\!/_2; \quad t_{Z1} = 0{,}0314 \text{ м }).$$

20. Расчет числа проводников в пазу $u_п$ по (10.15), числа сегментов s_{ct} и хорды H по (10.20), а также уточненной линейной нагрузки A по (10.16) сводим в табл. 10.15.

Наилучший результат дает вариант 3, который и принимаем для дальнейших расчетов.

$Z_1 = 90; s_{ct} = 6; H = 0{,}59$ м (сегменты штампуются из листов 600×1500 мм); $u_п = 24$; $q_1 = 2\,{}^1\!/_2; t_{Z1} = 0{,}0314$ м; $A = 440 \cdot 10^2$ А/м.

Пазы и обмотка статора

21. Ширина паза (предварительно) по (10.21)

$b_{п1} = 0{,}39 t_{Z1} = 0{,}39 \cdot 0{,}0314 = 0{,}012$ м (12 мм).

22. Поперечное сечение эффективного проводника обмотки статора (предварительно) по (10.22)

$$q_{эф} = \frac{I_{ном.ф}}{aJ_1} = \frac{57{,}1}{1 \cdot 4{,}9 \cdot 10^6} = 11{,}7 \cdot 10^{\ 6} \text{ м}^2 \ (11{,}7 \text{ мм}^2),$$

где

$J_1 = AJ_1 / A = 2150 \cdot 10^6 / 440 \cdot 10^2 = 4{,}9 \cdot 10^6$ А/м

(AJ_1 — по рис. 10.16, кривая *2*).

23. Возможная ширина изолированного проводника по (10.25)

$b'_{1из} = b_{п1} - b_{из.п} = 12 - 4{,}7 = 7{,}3$ мм.

Изоляция катушек выбрана для класса нагревостойкости В по табл. 3.5. Двусторонняя толщина изоляции $\delta_{из.п} = 4{,}7$ мм.

24. Размеры проводников обмотки. Принимаем, что эффективный проводник состоит из одного элементарного ($q_{эф} = 11{,}7 < 18$ мм^2). Марка провода ПЭТВСД с толщиной двусторонней изоляции 0,5 мм. Ширина голого прямоугольного проводника (предварительная) 7,3…0,5 = 6,8 мм.

По табл. П3.3 размеры медного проводника равны $a_1 \times b_1 = 1{,}8 \cdot 7{,}1$ мм (с изоляцией $a_{1из} \times b_{1из} = 2{,}3 \cdot 7{,}6$ мм), $q_{эф} = 12{,}42$ мм ($12{,}42 \cdot 10^{-6}$ мм^2).

25. Ширина паза (уточненная) по (10.27)

$b_{п1} = n_ш b_{1из} + \delta_{из.п} + \delta_{р.щ} + \delta_ш = 1 \cdot 7{,}7 + 4{,}7 + 0{,}05 + 0{,}2 = 12{,}5$ мм.

26. Высота паза по (10.28)

$h_{п1} = u_п n_B a_{1из} + \sum \delta_{из} + h_k + \delta_{р.B} + \delta_B = 24 \cdot 1 \cdot 2{,}3 + 12{,}4 + 5 + 1{,}2 + 0{,}2 \approx 74$ мм,

где

$\delta_{р.B} = 0{,}5 n_B u_п = 0{,}05 \cdot 1 \cdot 24 = 1{,}2$ мм.

Масштабный эскиз паза дан на рис. 10.44, спецификация паза приведена в табл. 10.16.

Таблица 10.15. **Расчетные значения**

№ варианта	Число пазов Z_1	Число сегментов s_{ct}	Хорда H, м	Число пазов в сегменте $Z_s - Z_1 / s_{ct}$	Число пазов на полюс и фазу q_1	Число параллельных ветвей a	Число проводников в пазу u_n	Пазовое (зубцовое) деление t_{Z1}, м	Линейная нагрузка A, А/м
1	81 = −3·3·3·3	9	0,402	9	$2\frac{1}{4}$	1	26	0,035	42600
2	90 = =2·5·3·3	5	0,695	18	$2\frac{1}{2}$	1	24	0,0314	44000
3	90 − =2·5·3·3	6	0,59	15	$2\frac{1}{2}$	1	24	0,0314	44000
4	90 = −2·5·3·3	9	0,402	10	$2\frac{1}{2}$	1	24	0,0314	44000

Таблица 10.16. **Спецификация паза (изоляция класса нагревостойкости В)**

Позиция на рис. 10.44	Наименование	Число слоев		Толщина, мм	
		по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
1	Провод ПЭТВСД $\frac{1{,}8 \times 7{,}1}{2{,}3 \times 7{,}6}$ мм	1	24	$1 \times 7{,}6$	$2(12 \times 2{,}3)$
2	Лента стеклослюдинитовая ЛС 0,13 мм	6 слоев	Вполнахлеста	4,5	4,5
3	Лента стеклянная ЛЭС (покровная) 0,1 мм	1 слой	Встык	0,2	0,2
	Двусторонняя толщина изоляции одной катушки	—	—	4,7	4,7
4	Стеклотекстолит СТ1 толщиной 1 мм		2		2
5	Стеклотекстолит СТ1 толщиной 0,5 мм	—	2	—	1
	Общая толщина изоляции на паз	—	—	4,7	12,4
	Разбухание изоляции	—	—	0,05	1,2
	Допуск на укладку	—	—	0,2	0,2
6	Клин	—	—	—	5
	Всего			12,5	74

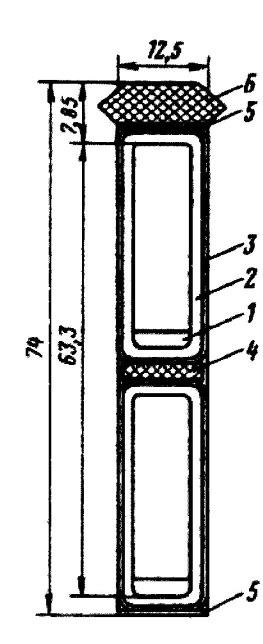


Рис. 10.44. Паз статора

27. Уточненное значение плотности тока в проводнике обмотки статора

$J_1 = I_{ном.ф} / nq_{эф} = 27{,}1/1 \cdot 12{,}42 \cdot 10^{\ 6} = 4{,}6 \cdot 10^6$ А/м².

28. Проверка индукции в зубце статора (приближенно) по (10.31):

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta ном} t_{Z1} l_\delta}{(t_{Z1} - b_{n1}) l_{c1} k_c} = \frac{0{,}89 \cdot 00314 \cdot 0{,}33}{(0{,}0314 - 0{,}0125) \cdot 0{,}301 \cdot 0{,}93} = 1{,}74 \text{ Тл.}$$

29. Проверка индукции в ярме статора (приближенно) по (10.32):

$$B_a = \frac{\alpha_\delta B_{\delta ном} \tau l_\delta}{2 h_a l_{c1} k_c} = \frac{0{,}66 \cdot 0{,}89 \cdot 0{,}236 \cdot 0{,}33}{2 \cdot 0{,}066 \cdot 0{,}301 \cdot 0{,}93} = 1{,}24 \text{ Тл;}$$

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{n1} = \frac{1{,}18 - 0{,}9}{2} - 0{,}074 = 0{,}066 \text{ м;}$$

B_{Z1} и B_a находят в допустимых пределах.

30. Перепад температуры в изоляции паза по (10.33);

$$\Delta\vartheta_{èç} = \frac{J_1 A k_{\hat{o}}}{4{,}2 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{t_{Z1}}{2 \cdot (b_{ï1} + h_{ï1} - h_{ê})} \cdot \frac{0{,}5\delta_{èç.ï}}{\lambda_{èç}} =$$

$$= \frac{4{,}6 \cdot 10^6 \cdot 44000 \cdot 1{,}1}{4{,}2 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{0{,}0314}{2 \cdot (0{,}0125 + 0{,}074 - 0{,}005)} \cdot \frac{0{,}5 \cdot 0{,}0047}{2{,}2 \cdot 10^{\ 5}} == 11{,}5^0 \tilde{N} < 35^0 C.$$

31. Градиент температуры в изоляции паза

$\Delta\vartheta' = \Delta\vartheta / 0{,}5\delta_{из.п} = 11/0{,}00235 = 4680{,}85^0$ С/м.

Проведенная проверка показала, что размеры паза выбраны удачно.

32. Витки фазы обмотки статора по (10.37)

$$w_1 = 2pq_1 \frac{u_n}{2} \cdot \frac{1}{a} = 2 \cdot 6 \cdot 2\,{}^1\!/_2 \frac{24}{2} \cdot 1 = 360\,.$$

33. Шаг обмотки по (10.38)

$y_1 \approx (0{,}8 - 0{,}86)\tau_n = (0{,}8 - 0{,}86)7{,}5 = 6$ (из 1-го в 7-й паз);

$$\tau_n = 3q_1 = 3 \cdot 2\,{}^1\!/_2 = 7{,}5; \qquad \beta = \frac{y_1}{\tau_n} = \frac{6}{7{,}5} = 0{,}8\,.$$

34. Коэффициент укорочения шага по (10.39)

$$k_y = \sin\frac{\pi}{2} \cdot \frac{y_1}{\tau_n} = \sin\frac{\pi}{2}\frac{6}{7{,}5} = 0{,}95\,.$$

35. Коэффициент распределения обмотки статора по (10.40)

$$k_p = \frac{0{,}5}{q_1 \sin\frac{\pi}{6q_1}} = \frac{0{,}5}{5\sin\frac{\pi}{6 \cdot 5}} = 0{,}957\,.$$

Так как q_1 дробное, то в формулу вместо q_1 подставляется $(bd + c) = 5$.

36. Обмоточный коэффициент по (10.41)

$k_{об1} = k_y k_p = 0{,}95 \cdot 0{,}957 = 0{,}909$.

Воздушный зазор и полюсы ротора

37. Исходя из данных отношения $M_{\max} / M_{ном} \approx 2{,}2$, по рис. 10.18. находим $x_{d*} \approx 1{,}3$.

Приближенное значение воздушного зазора по (10.44)

$$\delta = 0{,}285\frac{A}{B_{\delta 0}}\cdot\frac{\tau}{x_{d*}}\cdot 10^{\;6} = 0{,}285\frac{44000}{0{,}846}\cdot\frac{0{,}236}{1{,}30}\cdot 10^{\;6} = 0{,}269\cdot 10^{\;2}\ \text{м};$$

$$B_{\delta 0} = 0{,}95 B_{\delta ном} = 0{,}95\cdot 0{,}89 = 0{,}846\ \text{Тл}.$$

38. Принимаем воздушный зазор под серединой полюса равным 0,0027 м (2,7 мм). Зазор под краями полюса $\delta_m = 1{,}5\delta = 1{,}5\cdot 2{,}7 \approx 4$ мм. Среднее значение воздушного зазора

$$\delta' = \delta + (\delta_m - \delta)/3 = 0{,}0027 + (0{,}004 - 0{,}0027)/3 = 0{,}00313\ \text{м (3,13 мм)}.$$

39. Ширина полюсного наконечника определяется по (10.47). Примем $a = 0{,}7$ (см. § 10.9):

$$b_p = a\tau = 0{,}7\cdot 0{,}236 = 0{,}165\ \text{м}.$$

40. Радиус дуги полюсного наконечника по (10.45)

$$R_p = \frac{D}{2 + 8D\dfrac{\delta_m - \delta}{b_p^2}} = \frac{0{,}9}{2 + 8\cdot 0{,}9\dfrac{0{,}004 - 0{,}0027}{0{,}165^2}} = 0{,}384\ \text{м}.$$

41. Высота полюсного наконечника по табл. 10.9 при $\tau = 0{,}236$ м

$$h_p = 0{,}031\ \text{м}.$$

42. Длина сердечника полюса и полюсного наконечника

$$l_m = l_p = l_1 - 0{,}01 = 0{,}36 - 0{,}01 = 0{,}35\ \text{м}.$$

43. Расчетная длина сердечника полюса определяется по (10.52). Принимаем $l_f = 0{,}02$ м:

$$l'_m = l_m + l_f = 0{,}35 + 0{,}02 = 0{,}37\ \text{м}.$$

44. Предварительная высота полюсного сердечника по (10.48)

$$h_m \approx 0{,}016 + 0{,}186\sqrt[4]{\tau} = 0{,}016 + 0{,}186\sqrt[4]{0{,}236} = 0{,}146\ \text{м}.$$

45. Коэффициент рассеяния полюсов находится по (10.50). При $h_p = 0{,}031$ м, $k = 7$ (см. с. 41):

$$\sigma_m = 1 + k\frac{0{,}35\delta}{\tau^2} = 1 + 7\frac{0{,}35\cdot 0{,}0027}{0{,}236^2} = 1{,}119.$$

46. Ширина полюсного сердечника определяется по (10.51). Задаемся $B_m = 1{,}43$ Тл; $k_{cp} = 0{,}95$ (полюсы выполнены из стали марки Ст3 толщиной 1 мм):

$$b_m \approx \frac{\alpha_\delta B_{\delta ном}\tau l_\delta}{B_m k_{cp} l'_m}\sigma_m = \frac{0{,}66\cdot 0{,}89\cdot 0{,}236\cdot 0{,}33}{1{,}43\cdot 0{,}95\cdot 0{,}37}\cdot 1{,}119 = 0{,}102\ \text{м}.$$

Выбираем $b_m = 0{,}102$ м.

Эскиз полюсов дан на рис. 10.45. Так как

$$v_p = \frac{\pi D n_{ном}}{60} = \frac{\pi\cdot 0{,}9\cdot 500}{60} = 23{,}6 < 30\ \text{м/с},$$

то принимаем крепление полюсов шпильками к ободу магнитного колеса.

47. Длина ярма (обода) ротора по (10.53)

$$l_j = l_m + \Delta l_c = 0{,}35 + 0{,}12 = 0{,}47\ \text{м}.$$

Выбрано $\Delta l_c = 0{,}12$ м.

48. Минимальная высота ярма ротора по (10.54)

$$h_j = \frac{\alpha_\delta B_{\delta ном}\tau l_\delta}{2B_j l_j}\sigma_m = \frac{0{,}66\cdot 0{,}89\cdot 0{,}236\cdot 0{,}33}{2\cdot 1{,}2\cdot 0{,}47}\cdot 1{,}119 = 0{,}045\ \text{м}.$$

Принято $B_j = 1{,}2$ Тл; h_j уточняется по чертежу.

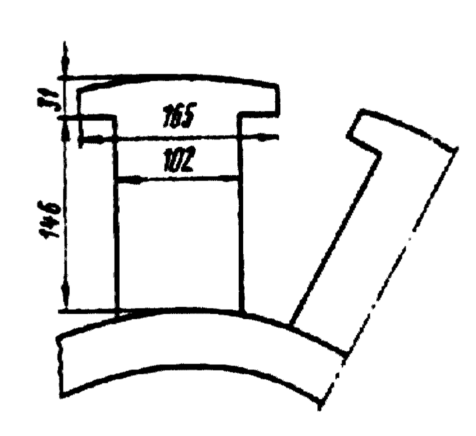


Рис. 10.45. Полюсы ротора

49. Число стержней пусковой обмотки на полюс

$N_c = 6$

50. Поперечное сечение стержня пусковой обмотки по (10.55)

$$q_c = \frac{(0{,}25 - 0{,}35)\tau A}{N_c J_1} = \frac{0{,}3 \cdot 0{,}236 \cdot 44000}{6 \cdot 4{,}6 \cdot 10^6} = 112{,}8 \cdot 10^{\ 6} \text{ м}^2.$$

51. Диаметр стержня находим по (10.56), материал стержня — медь:

$$d_c = 1{,}13\sqrt{q_c} = 1{,}13\sqrt{112{,}8 \cdot 10^{\ 6}} = 11{,}95 \cdot 10^{\ 3} \text{ м (11,95 мм)}.$$

Вбираем $d_c = 12 \cdot 10^{\ 3}$ м, тогда $q_c = 113 \cdot 10^{\ 6}$ м.

52. Зубцовый шаг на роторе определяется по (10.57). Принимаем $z = 0{,}01$ м:

$$t_{Z2} = \frac{b_p - d_c - 2z}{N_c - 1} = \frac{0{,}165 - 0{,}012 - 2 \cdot 0{,}01}{6 - 1} = 0{,}0266 \text{ м (26,6 мм)}$$

53. Проверяем условие (10.60)

$$0{,}8t_{Z1} = 0{,}8 \cdot 0{,}0314 = 0{,}025 < t_{Z2} = 0{,}0266 \text{ м};$$

$$(N_c - 1)(1 - \frac{t_{Z2}}{t_{Z1}}) = (6-1)(1 - \frac{0{,}0266}{0{,}0314}) = 0{,}765 > 0{,}75.$$

Пазы выбраны круглые. Полузакрытые.

54. Диаметр паза ротора

$d_s = d_c + 0{,}0001 = 0{,}0121$ м (12,1 мм).

Раскрытие паза $b_s \times h_s = 4 \times 2$ мм.

55. Длина стержня по (10.61)

$l_c = l_p + 0{,}34r = 0{,}35 + 0{,}34 \cdot 0{,}236 = 0{,}43$ м.

56. Сечение короткозамыкающего сегмента

$q_{кз} = b_{кз}h_{кз} = 0{,}5N_c q_c = 0{,}5 \cdot 6{,}113 \cdot 10^{\ 6} = 339 \cdot 10^{\ 6}$ м^2 (339 мм^2).

По табл. П3.6 выбираем прямоугольную медь 10×35 мм (сечение $q_{кз} = 349{,}1$ мм^2).

Расчет магнитной цепи

Для магнитопровода статора выбираем сталь марки 1511 толщиной 0,5 мм. Полюсы ротора выполняют из стали марки Ст3 толщиной 1 мм. Крепление полюсов к ободу магнитного колеса осуществляют с помощью шпилек и гаек. Толщину обода (ярма ротора) принимают $h_j = 45$ мм (см. выше) (см. приложение 1).

57. Магнитный поток в зазоре по (10.62)

$$\Phi = \frac{E}{4k_B f w_1 k_{об1}} = \frac{E}{4 \cdot 1{,}152 \cdot 50 \cdot 360 \cdot 0{,}915} = 0{,}131 \cdot 10^{\ 4} E_1.$$

По рис. 10.21 при $\delta_в / \delta \approx 1{,}5; a = 0{,}7$ и $\frac{\delta}{\tau} = \frac{0{,}0027}{0{,}236} = 0{,}0114$ находим $k_B = 1{,}154$ и $\alpha_\delta = 0{,}66$.

58. Уточненное значение расчетной длины статора по (10.64) равно:

$$l_\delta = l_1 - b'_к n_к + 2\delta' = 0{,}36 - 0{,}00423 \cdot 6 + 2 \cdot 0{,}00313 = 0{,}341 \text{ м};$$

$$b'_к = \gamma'\delta = 1{,}57 \cdot 0{,}27 \cdot 10^{\ 2} = 0{,}00423 \text{ м};$$

$$\gamma' = \frac{(b_к / \delta)^2}{5 + b_к / \delta} = \frac{\left[(1 \cdot 10^{\ 2})/(0{,}27 \cdot 10^{\ 2})\right]^2}{5 + (1 \cdot 10^{\ 2})/(0{,}27 \cdot 10^{\ 2})} = 1{,}57.$$

59. Индукция в воздушном зазоре по (10.63), Тл,

$$B_\delta = \frac{\Phi}{\alpha_\delta \tau l_\delta} = \frac{0{,}131 \cdot 10^{\ 4}}{0{,}66 \cdot 0{,}236 \cdot 0{,}341} E_1 = 2466 \cdot 10^{\ 4} E_1.$$

60. Коэффициент воздушного зазора статора по (10.67)

$$k_{\delta 1}=\frac{t_{Z1}+10\delta'}{t_{Z1}-b_{\Pi 1}+10\delta'}=\frac{3{,}14\cdot 10^{\ 2}+10\cdot 0{,}313\cdot 10^{\ 2}}{(3{,}14-1{,}25)\cdot 10^{\ 2}+10\cdot 0{,}313\cdot 10^{\ 2}}=1{,}25\,.$$

61. Коэффициент воздушного зазора ротора по (10.67)

$$k_{\delta 2}=\frac{t_{Z2}+10\delta'}{t_{Z2}-b_{s}+10\delta'}=\frac{2{,}66\cdot 10^{\ 2}+10\cdot 0{,}313\cdot 10^{\ 2}}{(2{,}66-0{,}4)\cdot 10^{\ 2}+10\cdot 0{,}313\cdot 10^{\ 2}}=1{,}074\,.$$

62. Коэффициент воздушного зазора по (10.66)

$$k_{\delta}=k_{\delta 1}k_{\delta 2}=1.25\cdot 1.074=1.34\,.$$

63. Магнитное напряжение воздушного зазора по (10.65), А,

$$F_{\delta}=\frac{1}{\mu_0}B_{\delta}\delta k_{\delta}=\frac{1}{1{,}256\cdot 10^{\ 6}}2{,}466\cdot 10^{-4}0{,}27\cdot 10^{-2}\cdot 1{,}34E_1=0{,}71E_1\,.$$

64. Ширина зубца статора на высоте 1/3 h_{n1} от его коронки по (10.70)

$$b_{Z1\frac{1}{3}}=t_{Z1\frac{1}{3}}-b_{n1}=0{,}0329-0{,}0125=0{,}0204\ \text{м};$$

$$t_{Z1\frac{1}{3}}=\frac{\pi(D+2h_{n1}/3)}{Z_1}=\frac{\pi(0{,}9+2\cdot 0{,}074/3)}{90}=0{,}0329\ \text{м.}$$

65. Индукция в сечении зубца на высоте 1/3 h_{n1} по (10.69), Тл,

$$B_{Z1}=\frac{B_{\delta}t_{Z1}l_{\delta}}{b_{Z1\frac{1}{3}}l_{CT1}k_C}=\frac{2{,}466\cdot 10^{\ 4}\cdot 0{,}0314\cdot 0{,}341}{0{,}0204\cdot 0{,}301\cdot 0{,}93}E_1=4{,}62\cdot 10^{\ 4}E_1\,.$$

66. Магнитное напряжение зубцов статора по (10.68), А,

$$F_{Z1}=h_{n1}H_{Z1}=0{,}074H_{Z1}\,.$$

67. Индукция в спинке статора по (10.74), Тл,

$$B_a=\frac{\Phi}{2l_{c\Pi 1}h_a k_c}=\frac{0{,}131\cdot 10^{\ 4}}{2\cdot 0{,}301\cdot 0{,}066\cdot 0{,}93}E_1=3{,}55\cdot 10^{\ 4}E_1\,.$$

68. Магнитное напряжение спинки статора по (10.72), А,

$$F_a=\xi L_a H_a=14{,}6\cdot 10^{\ 2}\xi H_a;$$

$$L_a=\frac{\pi(D_a-h_a)}{4p}=\frac{\pi(1{,}18-0{,}0666)}{4\cdot 6}=14{,}6\cdot 10^{\ 2}\ \text{м};$$

ξ — по рис. 10.22.

69. Высота зубцов ротора по (10.76)

$$h_{Z2}=h_s+d_s=0{,}2\cdot 10^{\ 2}+1{,}21\cdot 10^{\ 2}=1{,}41\cdot 10^{\ 2}\ \text{м.}$$

70. Ширина зубцов ротора по высоте $h_{Z2\frac{1}{3}}$ от его коронки по (10.78)

$$b_{Z2\frac{1}{3}}=\frac{D-2\delta-2/3h_{Z2}}{D-2\delta}t_{Z2}-0{,}94d_s=\frac{(90-2\cdot 0{,}27-2/3\cdot 1{,}41)\cdot 10^{\ 2}}{(90-2\cdot 0{,}27)\cdot 10^{\ 2}}2{,}65\cdot 10^{\ 2}-0{,}94\cdot 1{,}21\cdot 10^{\ 2}=$$

$$=1{,}48\cdot 10^{\ 2}\text{м}$$

71. Индукция в зубце ротора по (10.77), Тл,

$$B_{Z2}=\frac{B_{\delta}t_{Z2}l_{\delta}}{b_{Z2\frac{1}{3}}l_p k_{cp}}=\frac{2{,}48\cdot 10^{\ 4}\cdot 2{,}65\cdot 10^{\ 2}\cdot 34\cdot 10^{\ 2}}{1{,}48\cdot 10^{\ 2}\cdot 36\cdot 10^{\ 2}\cdot 0{,}95}E_1=4{,}4\cdot 10^{\ 4}E_1\,.$$

72. Магнитное напряжение зубцов ротора по (10.75), А,

$$F_{Z2}=h_{Z2}H_{Z2}=1{,}41\cdot 10^{\ 2}H_{Z2}\,.$$

73. Удельная магнитная проводимость рассеяния между внутренними поверхностями сердечника полюсов по (10.81)

$$\lambda_{ml} = \frac{0{,}55 h_m \cdot 10^{6}}{\tau - b_m - \frac{\pi}{2p}(h_m + 2h_p + 2\delta)} = \frac{0{,}55 \cdot 14{,}6 \cdot 10^{2} \cdot 10^{6}}{\left[23{,}6 - 10{,}2 - \frac{\pi}{2 \cdot 6}(14{,}6 + 2 \cdot 3{,}1 + 2 \cdot 0{,}27\right] \cdot 10^{2}} = 1{,}027 \cdot 10^{6}.$$

74. Удельная магнитная проводимость между внутренними поверхностями полюсных наконечников по (10.82)

$$\lambda_{pl} = \left[1{,}4(\frac{d_t}{d_p} - 0{,}25) + 0{,}55(\frac{c_p}{d_p} + 0{,}2) - 0{,}4(\frac{c_p}{d_p} - 0{,}5)^2\right] \cdot 10^{6} =$$

$$= \left[1{,}4(\frac{2{,}614 \cdot 10^{2}}{5{,}73 \cdot 10^{2}} - 0{,}25) + 0{,}55(\frac{3{,}15 \cdot 10^{2}}{5{,}73 \cdot 10^{2}} + 0{,}2) - 0{,}4(\frac{3{,}15 \cdot 10^{2}}{5{,}73 \cdot 10^{2}} - 0{,}5)^2\right] \cdot 10^{6} = 0{,}7 \cdot 10^{6}$$

где

$$c_p = \frac{b_p - b_m}{2} = \frac{16{,}5 - 10{,}2}{2} \cdot 10^{2} = 3{,}15 \cdot 10^{2} \text{ м};$$

$$d_t = h_p + \delta - \frac{b_p^2}{4D} = (3{,}1 + 0{,}27) \cdot 10^{2} - \frac{16{,}5^2 \cdot 10^{4}}{4 \cdot 90 \cdot 10^{2}} = 2{,}61 \cdot 10^{2} \text{ м};$$

$$d_p = \tau - b_p - \frac{\pi d_t}{p} = (23{,}6 - 16{,}5 - \frac{3{,}14 \cdot 2{,}614}{6}) \cdot 10^{2} = 5{,}73 \cdot 10^{2} \text{ м}.$$

75. Удельная магнитная проводимость рассеяния между торцевыми поверхностями по (10.83)

$$\lambda_{mb} = 0{,}37 \frac{b_m}{l_m} \cdot 10^{6} = 0{,}37 \cdot \frac{10{,}2 \cdot 10^{2}}{37 \cdot 10^{2}} \cdot 10^{6} = 0{,}102 \cdot 10^{6}.$$

76. Удельная магнитная проводимость для потока рассеяния

$$\lambda_{m\sigma} = \lambda_{ml} + \lambda_{pl} + \lambda_{mb} = (1{,}027 + 0{,}7 + 0{,}102) \cdot 10^{6} = 1{,}829 \cdot 10^{6}.$$

77. Магнитное напряжение ярма статора, зазора и зубцов полюсного наконечника, А,

$$F_{\delta Za} = F_\delta + F_{Z1} + F_a + F_{Z2}.$$

78. Поток рассеяния полюса по (10.80), Вб,

$$\Phi_\sigma = 4\lambda_{m\sigma} l_m F_{\delta Za} = 4 \cdot 1{,}829 \cdot 10^{6} \cdot 37 \cdot 10^{2} F_{\delta Za} = 2{,}71 \cdot 10^{6} F_{\delta Za}.$$

79. Поток в сечении полюса у его основании, Вб,

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_\sigma = 0{,}131 \cdot 10^{4} E_1 + 2{,}71 \cdot 10^{6} F_{\delta Za}.$$

80. Индукция в полюсе по (10.84), Тл,

$$B_m = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{l_m b_m k_{cp}} = \frac{0{,}131 \cdot 10^{4} E_1 + 2{,}71 \cdot 10^{6} F_{\delta Za}}{3{,}71 \cdot 10^{2} \cdot 10{,}2 \cdot 10^{2} \cdot 0{,}95} = 0{,}364 \cdot 10^{3} E_1 + 0{,}764 \cdot 10^{4} F_{\delta Za}.$$

81. Магнитное напряжение полюса по (10.79), А,

$$F_m = h_{mp} H_m = 17{,}7 \cdot 10^{2} H_m,$$

где

$$h_{mp} = h_m + h_p = (14{,}6 + 3{,}1) \cdot 10^{2} = 17{,}7 \cdot 10^{2} \text{ м}.$$

82. Магнитное напряжение стыка между полюсом и ярмом ротора по (10.86), А,

$$F_{\delta mj} = 250 B_m.$$

83. Индукция в ободе магнитного колеса (ярме ротора), по (10.88), Тл,

$$B_j = \frac{\Phi + \Phi_\sigma}{2l_j h_j k_{cp}} = \frac{0{,}131 \cdot 10^{\;4} E_1 + 2{,}71 \cdot 10^{\;6} F_{\delta Za}}{2{,}47 \cdot 10^{\;2} \cdot 4{,}5 \cdot 10^{\;2} \cdot 1} = 0{,}312 \cdot 10^{\;3} E_1 + 0{,}645 \cdot 10^{\;4} F_{\delta Za}.$$

84. Магнитное напряжение в ободе магнитного колеса по (10.87), А,

$$F_j = L_j H_j = 6{,}48 \cdot 10^{\;2} H_j,$$

где

$$L_j = \frac{\pi(D - 2\delta - 2h_{mp} - h_j)}{4p} = \frac{\pi(90 - 2 \cdot 0{,}27 - 2 \cdot 17{,}7 - 4{,}5) \cdot 10^{\;2}}{4 \cdot 6} = 6{,}48 \cdot 10^{\;2} \text{ м.}$$

85. Сумма магнитных напряжений сердечника полюса, ярма ротора и стыка между полюсом и ярмом, А,

$$F_{mj} = F_m + F_{\delta mj} + F_j.$$

86. Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи, А, (10.89)

$$F_{f0} = F_{\delta Za} + F_{mj} = F_\delta + F_{Z1} + F_a + F_{Z2} + F_m + F_{\delta mj} + F_j.$$

Результаты расчета магнитной цепи сведены в табл. 10.17.

При переводе магнитных напряжений $F_{f0}, F_{\delta Za}, F_m$ и потоков Φ и Φ_m в относительные единицы за базовые значения соответственно приняты МДС F_{f0} и Φ при $E_1 = U_{ном.ф}(E_{1*} = 1)$.

По табл. 10.17 на рис. 10.46 построена в относительных единицах характеристика холостого хода $E_{1*} = f(F_{f0*})$. На этом же рисунке приведена нормальная характеристика холостого хода.

Параметры обмотки статора для установившегося режима

87. Средняя длина витка обмотки статора

$$l_{cp1} = 2(l_1 + l_л) = 2(0{,}36 + 0{,}384) = 1{,}488 \text{ м.}$$

88. Длина лобовой части обмотки статора по (9.139)—(9.143) и рис. 9.49

$$l_л = \frac{\pi(D + h_{n1})\beta}{2p\sqrt{1 - \left(\frac{b_1 + s_i}{t_{Z1}}\right)^2}} + h_{n1} + 2B_1 = \frac{\pi(0{,}9 + 0{,}074)0{,}8}{2 \cdot 6\sqrt{1 - \left(\frac{0{,}0071 + 0{,}0065}{0{,}034}\right)^2}} + 0{,}074 + 2 \cdot 0{,}045 = 0{,}384 \text{ м.}$$

где b_1=0,0071 м — ширина проводника; B_1 и S_i — по рис. 9.49.

89. Активное сопротивление обмотки статора по (10.95)

$$r_{1(20)} = \frac{w_1 l_{cp1}}{57 \cdot 10^6 q_{эф} a} = \frac{360 \cdot 1{,}488}{57 \cdot 10^6 \cdot 12{,}42 \cdot 10^{\;6} \cdot 1} = 0{,}757 \text{ Ом}$$

при ϑ =20⁰ С;

$$r_{1(75)} = 1{,}20 r_{1(20)} = 1{,}20 \cdot 0{,}757 = 0{,}91 \text{ Ом}$$

при ϑ =75⁰ С.

90. Активное сопротивление обмотки статора в относительных единицах по (10.96)

$$r_{1(75^0)} / Z_б = 0{,}91 / 60{,}7 = 0{,}015;$$

$$Z_б = U_{ном.ф} / I_{ном.ф} = 60{,}7 \text{ Ом.}$$

91. Индуктивное сопротивление рассеяния по (10.97)

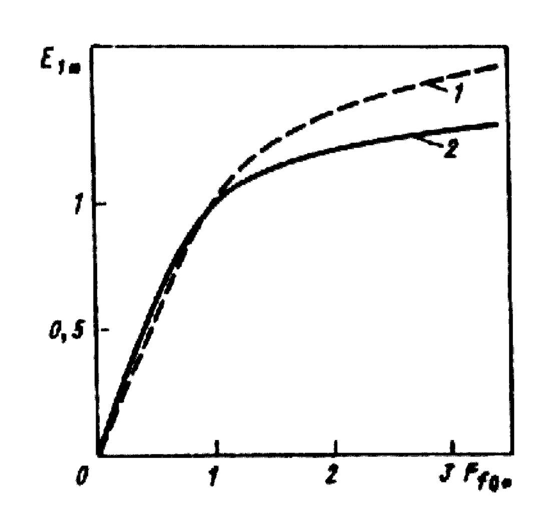


Рис. 10.46. Характеристика холостого хода:
1 — расчетная характеристика;
2 — нормальная характеристика

Таблица 10.17. **Результаты расчета магнитной цепи**

Расчетная величина	Единица величины	E_{1*} и Φ_*				
		0,5	1	1,1	1,2	1,3
E_1	В	1734	3468	3814,8	4161,6	4508,4
$\Phi = 0{,}131 \cdot 10^{\ 4} E_1$	Вб	0,0227	0,0454	0,05	0,0545	0,0591
$B_\delta\ = 2{,}466 \cdot 10^{\ 4} E_1$	Тл	0,428	0,86	0,941	1,026	1,112
$F_\delta = 0{,}71 E_1$	А	1231	2462,3	2708,5	2954,7	3201
$B_{Z1}\quad 4{,}62 \cdot 10^{\ 4} E_1$	Тл	0,8	1,6	1,76	1,92	2,08
H_{Z1}	А/м	254	6700	19000	29000	61000
$F_{Z1} = 0{,}074 H_{Z1}$	А	18,8	495,8	1406	2146	4514
$B_a = 3{,}55 \cdot 10^{\ 4} E_1$	Тл	0,62	1,23	1,35	1,48	1,6
ξ		0,63	0,42	0,4	0,32	0,3
H_a	А/м	156	810	1410	3370	6700
$F_a\ = 14{,}6 \cdot 10^{\ 2} \xi H_a$	А	14,3	49,6	82,3	157	293,5
$B_{Z2}\ - 4{,}41 \cdot 10^{\ 4} E_1$	Тл	0,76	1,53	1,68	1,84	1,99
H_{Z2}	А/м	380	2710	6230	13400	26200
$F_{Z2} = 1{,}41 \cdot 10^{\ 2} H_{Z2}$	А	5,36	38,21	87,8	188,9	369,4
$F_{\delta Za}\ = F_\delta + F_{Z1} + F_a + F_{Z2}$	А	1269,5	3045,9	4284,6	5446,6	8377,9
$\Phi_\sigma\quad 2{,}71 \cdot 10^{\ 6} F_{\delta Za}$	Вб	0,0034	0,0083	0,012	0,015	0,023
$\Phi_m\ = \Phi + \Phi_\sigma\ = 0{,}131 \cdot 10^{\ 4} E_1 + 2{,}71 \cdot 10^{\ 6} F_{\delta Za}$	Вб	0,026	0,0537	0,062	0,07	0,082
$B_m\ = 0{,}364 \cdot 10^{-3} E_1\ + 2{,}764 \cdot 10^{-4} F_{\delta Za}$	Тл	0,73	1,49	1,72	1,93	2,28
H_m	А/м	363	2110	4752	12508	37167

$F_m = 17{,}7 \cdot 10^{2} H_m$	А/м	64,25	373,5	841	2214	6578
$F_{\delta mj} = 250 B_m$	А	182,5	372,5	430	482,5	570
$B_j = 0{,}312 \cdot 10^{3} E_1 + 0{,}645 \cdot 10^{4} F_{\delta Za}$	Тл	0,622	1,276	1,47	1,63	1,95
H_j	А/м	506	1500	2620	4550	9600
$F_j = 6{,}48 \cdot 10^{2} H_j$	А	32,8	97,2	169,8	294,8	622
$F_{mj} = F_m + F_{\delta mj} + F_j$	А	279,5	843,2	1440,8	2991,3	7770
$F_{f0} = F_{\delta Za} + F_{mj}$	А	1549	3888	5725	8437,9	16148
F_{f0*}	—	0,398	1	1,47	2,17	4,15
Φ_{m*}		0,575	1,18	1,37	1,54	1,81
$\Phi_{\sigma*}$	—	0,075	0,18	0,27	0,34	0,51
$F_{\delta Za*}$		0,326	0,78	1,1	1,4	2,15
F_{mj*}		0,072	0,22	0,37	0,77	2
$F_{\delta Z0} / F_\delta$		1,03	1,24	1,58	1,84	2,62

Примечания. 1. При определении магнитного напряжения зубцов в тех случаях, когда $B_Z \rangle 1{,}8 T$ ($E_{1*} = 1{,}2$ или $E_{1*} = 1{,}3$), учитывалось ответвление потока в паз по коэффициентам:

для статора

$$k_{1n\frac{1}{3}} = \frac{t_{Z1\frac{1}{3}} l_1}{b_{Z1\frac{1}{3}} l_{cT1} k_c} - 1 = \frac{3{,}32 \cdot 10^{2} \cdot 36 \cdot 10^{2}}{2{,}04 \cdot 10^{-2} \cdot 30{,}1 \cdot 10^{-2} \cdot 0{,}93} - 1 = 1{,}09;$$

для ротора

$$k_{2n\frac{1}{3}} = \frac{t_{Z2\frac{1}{3}} l_p}{b_{Z2\frac{1}{3}} l_p k_{cp}} - 1 = \frac{2{,}62 \cdot 10^{2} \cdot 35 \cdot 10^{2}}{1{,}48 \cdot 10^{2} \cdot 35 \cdot 10^{2} \cdot 0{,}95} - 1 = 0{,}86.$$

2. При $B_m \geq 1{,}6$ Тл магнитное напряжение полюса определялось по трем сечениям.

$$x_\sigma = 15{,}8\frac{f}{100}\left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \frac{l_\delta}{pq_1}\left(\lambda_{п.к} + \lambda_л + \lambda_Д\right) = 15{,}8\frac{50}{100}\left(\frac{360}{100}\right)^2 \frac{0{,}34}{6\cdot 2{,}5}(2{,}215 + 0{,}66 + 0{,}442) = 7{,}7\ \text{Ом}.$$

92. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния по (10.98)

$\lambda_{п.k} = \lambda_п + \lambda_k = 2 + 0{,}215 = 2{,}215$.

Коэффициент магнитной проводимости между стенками паза по табл. 9.24

$$\lambda_п = \frac{h_2 - h_0}{3b_{п1}}k_\beta + \frac{h_1}{b_{п1}}k'_\beta + \frac{h_0}{4b_{п1}} = \frac{(6{,}33 - 0{,}67)10^{2}}{3\cdot 1{,}25\cdot 10^{2}}0{,}89 + \frac{0{,}785\cdot 10^{2}}{1{,}25\cdot 10^{2}}0{,}85 + \frac{0{,}67\cdot 10^{2}}{4\cdot 1{,}22\cdot 10^{2}} = 2$$

Размеры паза по рис. 8.50, a и 10.44: $h_2 = 6{,}33$ см; $b_{п1} = 1{,}25$ см; $h_1 = 0{,}785$ см; $h_0 = 0{,}67$ см.

При $\beta = y_1/\tau = 0{,}8$ по (9.156) и (9.158) k'_β и k_β:

$$k'_\beta = \frac{1+3\beta}{4} = \frac{1+3\cdot 0{,}8}{4} = 0{,}85;$$

$$k_\beta = \frac{1+3k'_\beta}{4} = \frac{1+3\cdot 0{,}85}{4} = 0{,}89.$$

Коэффициент магнитной проводимости по коронкам зубцов по (10.99)

$$\lambda_k = \left[\alpha\lambda'_k + \left(0{,}22 + 0{,}32\sqrt{\frac{t_{Z1} - b_{п1}}{b_{п1}}}\right)(1-\alpha)\right]k'_\beta = \left[0{,}7\cdot 0{,}1 + \left(0{,}22 + 0{,}32\sqrt{\frac{(3{,}14 - 1{,}25)\cdot 10^{2}}{1{,}25\cdot 10^{2}}}\right)(1 - 0{,}7)\right]0{,}85 =$$

$= 0{,}215.$

При $\dfrac{b_{п1}}{\delta' k_\delta} = \dfrac{1{,}25\cdot 10^{2}}{0{,}313\cdot 10^{2}\cdot 1{,}35} = 2{,}96$ из рис. 10.26 $\lambda'_k = 0{,}1$.

93. Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния по (9.159)

$$\lambda_л = 0{,}34\frac{q_1}{l_\delta}(l_л - 0{,}64\beta\tau) = 0{,}34\frac{2{,}5}{34{,}1\cdot 10^{2}}\left(0{,}384 - 0{,}64\cdot 0{,}8\cdot 23{,}6\cdot 10^{2}\right) = 0{,}66.$$

94. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния по (10.100)

$$\lambda_Д = 0{,}03\frac{\tau\alpha_\delta}{\delta' k_\delta q_1} = 0{,}03\frac{23{,}6\cdot 10^{2}\cdot 0{,}66}{0{,}313\cdot 10^{2}\cdot 1{,}35\cdot 2{,}5} = 0{,}442.$$

95. Индуктивное сопротивление рассеяния в относительных единицах

$\dot{x}_\sigma = x_\sigma / Z_\delta = 7{,}7/60\cdot 6 = 0{,}13$.

96. Индуктивное сопротивление продольной реакции якоря в относительных единицах по (10.102)

$$x_{ad*} = \frac{k_{ad}F_{аном}}{k_{\mu 0}F_{\delta 0}} = \frac{0{,}87\cdot 4232}{1{,}26\cdot 2462{,}3} = 1{,}187,$$

где

$$F_{аном} = 0{,}45m\frac{w_1 k_{об1}}{p}I_{ном.ф} = 0{,}45\cdot 3\frac{360\cdot 0{,}915}{6}57{,}1 = 4232\ \text{А}$$

по (10.90); $k_{ad} = 0{,}87$ из рис. 10.24. По характеристике холостого хода (см. табл. 10.17) для $E_{1*} = 1$ МДС $F_{\delta 0} = 2462{,}3$ А.

Для ЭДС $E_{1*} = 0{,}5$

$k_{\mu 0} = F_{f0} / F_\delta = 1549/1231 = 1{,}26$.

97. Индуктивное сопротивление поперечной реакции якоря в относительных единицах по (10.103)

$$x_{aq*} = \frac{k_{aq}F_{аном}}{k_{\mu 0}F_{\delta 0}}\frac{1+k_\delta}{2} = \frac{0{,}435\cdot 4232}{1{,}26\cdot 2462{,}3}\frac{1+1{,}35}{2} = 0{,}697;$$

$k_{aq} = 0{,}435$ по рис. 10.24

98. Синхронное индуктивное сопротивление по продольной оси в относительных единицах

$x_{d*} = x_{\sigma *} + x_{ad*} = 0{,}13 + 1{,}187 = 1{,}317.$

99. Синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси в относительных единицах

$x_{q*} = x_{\sigma *} + x_{aq*} = 0{,}13 + 0{,}697 = 0{,}827.$

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения при нагрузке

100. По табл. 10.17. на рис. 10.47. построены частичные характеристики намагничивания $\Phi_* = E_{1*} = f(F_{\delta Za*}), \Phi_{\sigma *} = f(F_{\delta Za*}), \Phi_{m*} = f(F_{mj*})$, а на рис. 10.48 — зависимость $E_* = f(F_{\delta Za} / F_\delta)$.

Из векторной диаграммы диаграммы для номинального режима $(I_* = 1, U_* = 1$ и $\cos\varphi_{ном} = 0{,}9)$ (рис. 10.49) определяем $E_{\delta *} = 1{,}07$.

Из рис. 10.48 по $E_{\delta *} = 1{,}07$ находим $F_{\delta Za} / F_\delta = 1{,}45$, а затем из рис. 10.25 $k_d = 0{,}92; k_q = 0{,}62$ и $k = 0{,}0026$.

101. Для дальнейшего построение векторной диаграммы определяем МДС:

$F_{aq*} / \cos\psi = k_q k_{aq} F_{аном*} = 0{,}62\cdot 0{,}435\cdot 1{,}09 = 0{,}294$,

где $F_{аном*} = F_{аном} / F_{f\delta} = 4232 / 3888 = 1.09; F_{f\delta}$ — базовое значение МДС возбуждения (соответствует $E_{1*} = 1$).

По найденной МДС из характеристики $E_* = f(F_{\delta Za*})$ определяемая ЭДС $F_{aq*} / \cos\psi = 0{,}42$ (см. рис. 10.47), отложив которую на векторной диаграмме, получим направление, а затем и модуль $E_{rd*} = \Phi_{rd*} = 1{,}03$.

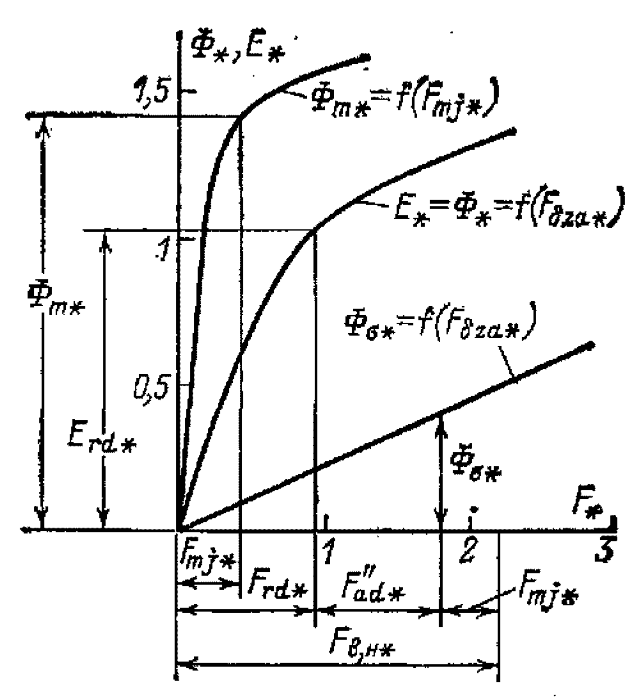


Рис. 10.47. Частичные характеристики намагничивания

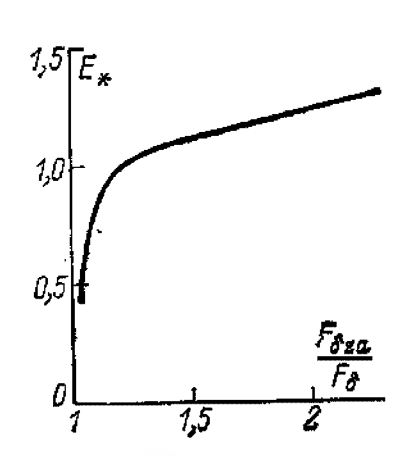


Рис. 10.48. Зависимость $E_* = f(F_{\delta Za} / F_\delta)$

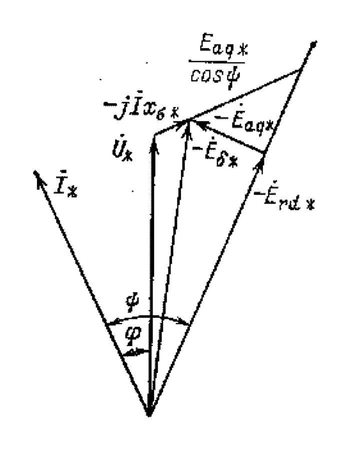


Рис. 10.49. Векторная диаграмма для номинальной нагрузки

Находим $\psi = 46^0, cos\psi = 0{,}69; \sin\psi = 0{,}72$.

Из характеристики $E_{1*} = f(F_{\delta Za*})$ по E_{rd*} определяем $F_{rd*} = 0{,}86$.

102. Полная МДС реакции якоря по продольной оси, А,

$$F''_{ad*} = \tilde{k}_d k_{ad} F_{aiii\ *} \cdot \sin\psi + \tilde{k}(\tau/\delta) F_{aiii\ *} \cdot \cos\psi =$$

$$= 0{,}92 \cdot 0{,}87 \cdot 1{,}09 \cdot 0{,}72 + 0{,}0026 \frac{23{,}6 \cdot 10^{2}}{0{,}27 \cdot 10^{2}} 1{,}09 \cdot 0{,}69 = 0{,}8.$$

По сумме $(F_{rd*} + F''_{ad*}) = (0{,}86 + 0{,}8) = 1{,}66$ из характеристики $\Phi_{\sigma*} = f(F_{\delta Za*})$ определяем $\Phi_{\sigma*} = 0{,}39$. Поток полюса $\Phi_{m*} = \Phi_{rd*} + \Phi_{\sigma*} = 1{,}03 + 0{,}39 = 1{,}42$.

Из характеристики $\Phi_{m*} = f(F_{mj*})$ по потоку $\Phi_{m*} = 1{,}42$ определяем $F_{mj*} = 0{,}46$.

103. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения в относительных единицах при номинальной нагрузке, А,

$$F_{fном*} = F_{rd*} + F''_{ad*} + F_{mj*} = 0{,}86 + 0{,}8 + 0{,}46 = 2{,}12.$$

104. Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения, А,

$$F_{fном} = F_{fном*} F_{f\delta} = 2{,}12 \cdot 3888 = 8243.$$

Обмотка возбуждения

Выбираем однорядную обмотку с лобовой частью в виде полуокружности. Изоляция класса нагревостойкости B.

105. Средняя длина витка обмотки возбуждения

$$l_{fcp} 2(l_m - 2\delta'') + \pi(b_m + 2\delta_1 + b_f) = 2(35 \cdot 10^{2} - 2 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{2}) + \pi(10{,}2 \cdot 10^{2} + 2 \cdot 0{,}15 \cdot 10^{2} + 1{,}4 \cdot 10^{2}) =$$

$$= 101{,}36 \cdot 10^{2}\ м,$$

где $\delta_1 = 0{,}15 \cdot 10^{2}$ м, $\delta'' = 1{,}5 \cdot 10^{2}$ м; $b_f \approx 0{,}06\tau = 0{,}06 \cdot 23{,}6 \cdot 10^{2} \approx 1{,}4 \cdot 10^{2}$ м.

Для питания обмотки возбуждения по табл. 10.10 выбираем тиристорное возбудительное устройство ТВУ -65-320 ($U_{fном} = 65$ В, $I_{fном} = 320$ А). Напряжение на кольцах с учетом переходного падения напряжения в щеточном контакте принимаем $U_f = 63$ В.

106. Сечение проводников обмотки возбуждения (предварительное значение) по (10.107)

$$q_f = \frac{\rho_{130} 2pF_{fном} l_{fcp}}{U_f} = \frac{1}{39 \cdot 10^6} \frac{2 \cdot 6 \cdot 9892 \cdot 101{,}36 \cdot 10^{2}}{63} = 49 \cdot 10^{6}\ м^2,$$

где $F_{fном} = 1{,}2 F_{fном} = 1{,}2 \cdot 8243 = 9892$.

107. Ток возбуждения по (10.111)

$$I_{fном} = q_f J_f = 49 \cdot 10^{6} \cdot 5{,}26 \cdot 10^6 = 258\ А.$$

Принимаем $J_f = 5{,}26 \cdot 10^6$ А/м².

108. Число витков обмотки возбуждения по (10.112)

$$w_f = F_{fном} / I_{fном} = 8243/258 \approx 32.$$

109. Меньший размер прямоугольного проводника обмотки возбуждения по (10.114), м,

$$a_f = \frac{h_m - \delta_{к.п.}}{w_f + 1} - \delta_n = \frac{14{,}6 \cdot 10^{2} - 1{,}4 \cdot 10^{2}}{32 + 1} - 0{,}03 \cdot 10^{2} = 0{,}37 \cdot 10^{2}.$$

Принимаем $\delta_{к.п.} = 1{,}4 \cdot 10^{2}$ м; $\delta_{п} = 0{,}03 \cdot 10^{2}$ м. По приложению 3 выбираем проводник с размерами $a_f \times b_f = 3{,}75 \times 14$ мм ($q_f = 51{,}95 \cdot 10^{6}$ м^2).

110. Расстояние между катушками соседних полюсов по (10.116)

$$x \approx \frac{\pi\left(D - 2\delta - 2h_p - 2h_m\right)}{2p} - b_m - 2\delta_1 - 2b_f = \frac{\pi(90 \cdot 10^{2} - 2 \cdot 0{,}27 \cdot 10^{2} - 2 \cdot 3{,}1 \cdot 10^{2} - 2 \cdot 14{,}6 \cdot 10^{2})}{2 \cdot 6} -$$

$$-10{,}2 \cdot 10^{2} - 2 \cdot 0{,}15 \cdot 10^{2} - 2 \cdot 1{,}4 \cdot 10^{2} = 0{,}846 \cdot 10^{2}.$$

111. Плотность тока в обмотке возбуждения (уточненное значение)

$$J_f = \frac{I_{fном}}{q_f} = \frac{258}{51{,}95 \cdot 10^{6}} = 4{,}97 \cdot 10^{6} \text{ А/м}^2.$$

112. Превышение температуры обмотки возбуждения по (10.119)

$$\Delta\vartheta_f = \frac{3 \cdot 10^{10}\left(2{,}8 + \frac{l_1}{\tau}\right) b_f J_f^2}{1{,}6 + \sqrt{V_p}} = \frac{3 \cdot 10^{10}\left(2{,}8 + \frac{36 \cdot 10^{2}}{23{,}6 \cdot 10^{2}}\right) 1{,}4 \cdot 10^{2} \cdot 4{,}97 \cdot 10^{12}}{1{,}6 + \sqrt{23{,}5}} = 69{,}7^0\, C < 80^0\, C;$$

$$V_p = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi \cdot 90 \cdot 10^{2} \cdot 500}{60} = 23{,}5 \text{ м/с}.$$

113. Уточненное значение высоты полюса

$$h_m = \left(a_f + \delta_п\right)\left(w_f + 1\right) + \delta_{к.п} = \left(0{,}375 \cdot 10^{2} + 0{,}03 \cdot 10^{2}\right) + \left(32 + 1\right) + 1{,}4 \cdot 10^{2} = 14{,}8 \cdot 10^{2} \text{ м}.$$

Так как расхождение с ранее выбранной высотой $h_m = 14{,}6 \cdot 10^{2}$ м составляет 1,5%, то пересчет магнитного напряжения полюса не производим.

114. Активное сопротивление обмотки возбуждения по (10.120)

$$r_{f(130)} = \rho_{(130)} \frac{2 p w_f l_{fcp}}{q_f} = \frac{1}{39 \cdot 10^{6}} \cdot \frac{2{,}6 \cdot 32 \cdot 1{,}0136}{51{,}95 \cdot 10^{6}} = 0{,}192 \text{ Ом};$$

$$r_{f(15)} = 0{,}192 \frac{39}{46} = 0{,}163 \text{ Ом}.$$

115. Напряжение на кольцах обмотки возбуждения при номинальной нагрузке и $\vartheta = 130^0$ С по (10.121)

$$U'_{fном} = I_{fном} r_{f130} = 258 \cdot 0{,}192 = 49{,}5 \text{ В}.$$

116. Коэффициент запаса возбуждения по (10.122)

$$\frac{U_{fном}}{U'_{fном} + \Delta U_{щ}} = \frac{65}{49{,}5 + 2} = 1{,}26.$$

Параметры и постоянные времени

117. Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения по (10.123)

$$x_{f*} = 1{,}27 k_{ad} x_{ad*}\left(1 + \frac{4 k_{\mu 0} F_{\delta 0} l_m \sum\lambda}{\Phi_\delta}\right) = 1{,}27 \cdot 0{,}87 \cdot 1{,}187\left(1 + \frac{4 \cdot 1{,}26 \cdot 2462{,}3 \cdot 37 \cdot 10^{2} \cdot 1{,}41 \cdot 10^{6}}{0{,}0454}\right) = 1{,}5,$$

где

$$\sum\lambda = \left(\lambda_{pl} + \frac{\lambda_{ml}}{1{,}53} + \frac{\lambda_{mb}}{2{,}65}\right) = \left(0{,}7 + \frac{1{,}027}{1{,}53} + \frac{0{,}102}{2{,}65}\right) \cdot 10^{6} = 1{,}41 \cdot 10^{6}.$$

118. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения по (10.124)

$$x_{\sigma f*} = x_{f*} - x_{ad*} = 1{,}5 - 1{,}187 = 0{,}313.$$

119. Индуктивное сопротивление рассеяния пусковой обмотки по продольной оси находим по (10.125) По отношению

$t_{Z2} / \tau - 2{,}66 \cdot 10^{-2} / 23{,}6 \cdot 10^{-2} - 0{,}112$

при $N_c = 6$ из рис. 10.38 определяем $k_b = 0{,}40; 1 + k_b = 1{,}40; 1 - k_b = 0{,}60$.

Из рис. 10.37. находим $C_d = 1; C_q = 1{,}7$. Тогда

$$\lambda_b = \left(0{,}785 - \frac{b_s}{2d_s}\right) + \frac{h_s}{b_s} = \left(0{,}785 - \frac{0{,}4 \cdot 10^{\ 2}}{2 \cdot 1{,}21 \cdot 10^{-2}}\right) + \frac{0{,}2 \cdot 10^{\ 2}}{0{,}4 \cdot 10^{-2}} = 1{,}12;$$

$$\lambda_{Д.У} = \frac{t_{Z2}}{12\delta' k_\delta} = \frac{2{,}66 \cdot 10^{\ 2}}{12 \cdot 0{,}313 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 35} = 0{,}52;$$

$$\lambda_{R.d} = 0{,}19 \frac{23{,}6 \cdot 10^{\ 2} \cdot 1}{6} = 0{,}71 \cdot 10^{\ 2};$$

$$x_{kd*} = 7{,}9 \frac{F_{аном}}{\Phi_\delta} \cdot \frac{10^{\ 6}}{1 - k_B}\left[\frac{l_p}{N_c}\left(\lambda_B + \lambda_{Д.У}\right) + \lambda_{R.d}\right] = 7{,}9 \frac{4232 \cdot 10^{\ 6}}{0{,}0454(1 - 0{,}4)}\left[\frac{0{,}35}{6}(1{,}12 + 0{,}52) + 0{,}71 \cdot 10^{\ 2}\right] = 0{,}126$$

120. Индуктивное сопротивление рассеяния пусковой обмотки по поперечной оси по (10.126)

$$x_{kq*} - 7{,}9 \frac{F_{аном}}{\Phi_\delta} \cdot \frac{10^{\ 6}}{1 + k_B}\left[\frac{l_p}{N_c}\left(\lambda_B + \lambda_{Д.У}\right) + \lambda_{R.q}\right] = 7{,}9 \frac{4232 \cdot 10^{\ 6}}{0{,}0454 \cdot 1{,}40}\left[\frac{0{,}35}{6}(1{,}12 + 0{,}52) + 0{,}013\right] - 0{,}057,$$

где

$$\lambda_{Rq} = 0{,}19 \frac{\tau C_q}{N_c} = 0{,}19 \frac{23{,}6 \cdot 10^{\ 2} \cdot 1{,}7}{6} = 1{,}3 \cdot 10^{-2}.$$

121. Активное сопротивление обмотки возбуждения при $\vartheta = 75^0 C$ по (10.135)

$$r_{f*} - \frac{0{,}44}{10^8} \cdot \frac{F_{аном} k_{ad}^2 l_{fcp}}{\Phi_\sigma f w_f q_f} - \frac{0{,}44}{10^8} \cdot \frac{4232 \cdot 0{,}87^2 \cdot 101{,}36 \cdot 10^{\ 2}}{0{,}0454 \cdot 50 \cdot 32 \cdot 51{,}95 \cdot 10^{\ 6}} - 0{,}0038.$$

122. Активное сопротивление пусковой обмотки по продольной оси при $\vartheta = 75^0 C$ по (10.136)

$$r_{kd*} = \frac{2{,}16}{10^8} \frac{F_{аном}}{f\Phi_\delta} \frac{1}{1 \quad k_b}\left(\frac{c_c l_c}{q_c N_c} + \frac{c_{к.з} \tau C_d}{q_{к.з} N_c}\right) = \frac{2{,}16 \cdot 4232 \cdot 1}{10^8 \cdot 50 \cdot 0{,}0454 \cdot (1 - 0{,}4)}\left(\frac{0{,}43}{113 \cdot 10^{\ 6} \cdot 6} + \frac{0{,}236 \cdot 1}{349{,}1 \cdot 10^{\ 6} \cdot 6}\right) = 0{,}05;$$

$C_c - C_{к.з} - 1$.

123. Активное сопротивление пусковой обмотки по поперечной оси при $\vartheta = 75^0 C$ по (10.137)

$$r_{kq*} = \frac{2{,}16}{10^8} \frac{F_{аном}}{f\Phi_\delta} \frac{1}{1 + k_b}\left(\frac{c_c l_c}{q_c N_c} + \frac{c_{к.з} \tau C_q}{q_{к.з} N_c}\right) = \frac{2{,}16 \cdot 4232 \cdot 1}{10^8 \cdot 50 \cdot 0{,}0454 \cdot (1 + 0{,}4)}\left(\frac{0{,}43}{113 \cdot 10^{\ 6} \cdot 6} + \frac{0{,}236 \cdot 1{,}7}{349{,}1 \cdot 10^{\ 6} \cdot 6}\right) = 0{,}024;$$

Масса активных материалов

124. Масса зубцов статора по (10.147)

$$m_{Z1} = 7800 l_{cl1} k_c h_{n1} b_{Z1_2} Z_1 = 7800 \cdot 30{,}1 \cdot 10^{\ 2} \cdot 0{,}93 \cdot 7{,}4 \cdot 10^{\ 2} \cdot 2{,}15 \cdot 10^{\ 2} \cdot 90 = 312{,}6 \text{ кг.}$$

где

$$b_{Z1_2} = \frac{\pi(D + h_{n1})}{Z_1} - b_{n1} = \frac{\pi(90 \cdot 10^{-2} + 7{,}4 \cdot 10^{-2}}{90} - 1{,}25 \cdot 10^{\ 2} = 2{,}15 \cdot 10^{\ 2} \text{ м.}$$

125. Масса ярма статора по (10.148)

$$m_a = 7800 l_{cl1} k_c \pi(D_a - h_a) h_a = 7800 \cdot 30{,}1 \cdot 10^{\ 2} \cdot 0{,}93 \cdot 3{,}14(118 \cdot 10^{\ 2} - 6{,}6 \cdot 10^{\ 2}) \cdot 6{,}6 \cdot 10^{\ 2} = 504{,}1 \text{ кг.}$$

126. Масса меди обмотки статора по (10.149)

$$m_{M1} = 8900 q_{эф} u_n Z_1 l_{ср1\ 2} = 8900 \cdot 12{,}42 \cdot 10^{\ 6} \cdot 24 \cdot 90 \cdot 1{,}48 / 2 = 177{,}6 \text{ кг.}$$

127. Масса меди обмотки возбуждения по (10.159)

$$m_{mf} = 8900 q_f l_{fср} 2 p w_f = 8900 \cdot 51{,}95 \cdot 10^{\ 6} \cdot 101{,}36 \cdot 10^{\ 2} \cdot 2 \cdot 6 \cdot 32 = 180 \text{ кг.}$$

128. Масса меди стержней пусковой обмотки по (10.151)

$$m_{M.C} = 8900 q_c \cdot 2 p N_c l_c = 8900 \cdot 113 \cdot 10^{\ 6} \cdot 2 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 0{,}43 = 31 \text{ кг.}$$

129. Масса меди короткозамыкающих колец по (10.152)

$$m_{M.к.з} = 8900 q_{к.з}(D - 2\delta - 2h_s - 2d_s)2\pi = 8900 \cdot 349{,}1 \cdot 10^{\ 6}(90 \cdot 10^{\ 2} - 2 \cdot 0{,}27 \cdot 10^{\ 2} - 2 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{\ 2} -$$

$$- 2 \cdot 1{,}21 \cdot 10^{\ 2}) \times 2 \cdot 3{,}14 = 16{,}9 кг$$

130. Масса стали полюсов по (10.153)

$$m_n = 7800 l_m k_{c.p} 2p(h_m b_m + 0{,}8 h_p b_p) = 7800 \cdot 37 \cdot 10^{\ 2} \cdot 0{,}95 \cdot 2 \cdot 6(14{,}8 \cdot 10^{\ 2} \cdot 10{,}2 \cdot 10^{\ 2} +$$

$$+ 0{,}8 \cdot 3{,}1 \cdot 10^{\ 2} \cdot 16{,}5 \cdot 10^{\ 2}) = 631{,}3 кг$$

131. Масса стали обода ротора по (10.154)

$$m_f = 7800 l_f \pi(d - 2\delta - 2h_{mp} - h_j)h_j = 7800 \cdot 47 \cdot 10^{\ 2} \cdot 3{,}14(90 \cdot 10^{\ 2} - 2 \cdot 0{,}27 \cdot 10^{\ 2} - 2 \cdot 17{,}9 \cdot 10^{\ 2} -$$

$$- 4{,}5 \cdot 10^{\ 2})4{,}5 \cdot 10^{\ 2} = 254{,}7 кг$$

132. Полная масса меди по (10.155)

$$m_M = m_{M1} + m_{Mf} + m_{M.C} + m_{M.к.з} = 177{,}6 + 180 + 31 + 16{,}9 = 405{,}5 \text{ кг}$$

133. Полная масса активной стали по (10.156)

$$m_{ст} = m_{Z1} + m_{a1} + m_M + m_f = 312{,}6 + 504{,}1 + 631{,}3 + 254{,}7 = 1702{,}7 \text{ кг.}$$

Потери и КПД

134. Основные электрические потери в обмотке статора по (10.159)

$$P_{Э1} = m I_{fном}^2 r_{1(75)} \cdot 10^{\ 3} = 3 \cdot 57{,}1^2 \cdot 0{,}91 \cdot 10^{\ 3} = 8{,}9 \text{ кВт.}$$

135. Потери на возбуждение по (10.161)

$$P_f = (I_{fном}^2 r_{f(75)} + 2\Delta U_щ I_{fном}) \cdot 10^{\ 3} = (258^2 \cdot 0{,}163 + 2 \cdot 1 \cdot 258)10^{\ 3} = 11{,}36 \text{ кВт.}$$

136. Магнитные потери в ярме статора по (10.162)

$$P_{a1} = k_{Дa} \rho_{1\ 50} B_a^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_{a1} \cdot 10^{\ 3} = 1{,}3 \cdot 1{,}56 \cdot 1{,}23^2 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} 504{,}1 \cdot 10^{\ 3} = 1{,}55 \text{ кВт.}$$

137. Магнитные потери в зубцах статора по (10.163)

$$P_{Z1} = k_{ДZ} \rho_{1\ 50} B_{Z1\ 3}^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} m_{Z1} \cdot 10^{\ 3} = 1{,}7 \cdot 1{,}56 \cdot 1{,}57^2 \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} 312.6 = 2{,}04 \text{ кВт.}$$

138. Механические потери по (10.164)

$$P_{мех} = 3{,}68 p \left(\frac{V_p}{40}\right) \sqrt{l_1} = 3{,}68 \cdot 6 \left(\frac{23{,}6}{40}\right)^3 \sqrt{0{,}36} = 2{,}72 \text{ кВт;}$$

$$V_p = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi \cdot 0{,}9 \cdot 500}{60} = 23{,}6 \text{ м/с.}$$

139. Поверхностные потери в полюсных наконечниках по (10.165)

$$P_{пов} = 0{,}5 \cdot 2 p \alpha \tau l_1 k_0 \left(\frac{Z_1 n}{10000}\right)^{1,5} (B_0 t_{Z1} \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{\ 3} = 0{,}5 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 0{,}7 \cdot 23{,}6 \cdot 10^{\ 2} \cdot 36 \cdot 10^{\ 2} \cdot 6 \left(\frac{90 \cdot 500}{10000}\right)^{1,5} \times$$

$$\times (0{,}215 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{\ 2} \cdot 10^3)^2 \cdot 10^{\ 3} = 0{,}97 кВт,$$

где $B_0 = B_{\delta 0}(k_{\delta 1} - 1) = 0{,}86(1{,}25 - 1) = 0{,}215$.

140. Добавочные потери при нагрузке

$$P_{ДОБ} = 0{,}005 P_{1ном} = 0{,}005 \cdot 533 = 2{,}67 \text{ кВт},$$

где

$$P_{1ном} = \sqrt{3} V_{ном} I_{ном.ф} \cos\varphi_{ном} \cdot 10^{\ 3} = \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 57{,}1 \cdot 0{,}9 \cdot 10^{\ 3} = 533 \text{ кВт}.$$

141. Общие потери при номинальной нагрузке по (10.166)

$$\sum P = P_{Э1} + P_f + P_{a1} + P_{Z1} + P_{мех} + P_{пов} + P_{ДОБ} = 8{,}9 + 11{,}36 + 1{,}55 + 2{,}04 + 2{,}72 + 0{,}97 + 2{,}67 = = 30{,}21 кВт.$$

142. Коэффициент полезного действия по (10.168)

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_{1ном}} = 1 - \frac{30{,}21}{533} = 0{,}94 .$$

Превышение температуры обмотки статора

143. Удельный тепловой поток на 1 м² внутреней поверхности статора по (10.169)

$$q_c = \frac{\left(P_{Э1} \frac{l_1}{l_{ср1} 2} + P_{ДОБ} + P_{a1} + P_{Z1} \right) \cdot 10^3}{\pi D l_1} = \frac{\left(8{,}9 \frac{0{,}36}{1{,}49/2} + 2{,}67 + 1{,}55 + 2{,}04 \right) \cdot 10^3}{3{,}14 \cdot 0{,}9 \cdot 36 \cdot 10^{\ 2}} = 10380 \text{ Вт/м}^2.$$

144. Превышение температуры внешней поверхности статора над температурой охлаждающего воздуха по (10.170)

$$\vartheta_{пов.с} = \frac{q_c}{\alpha(1 + 0{,}1 V_p)} = \frac{10380}{80(1 + 0{,}1 \cdot 23{,}6)} = 38{,}6^0 C.$$

145. Плотность теплового потока с внешней поверхности лобовых частей

$$q_л = \frac{AJ}{\gamma_\vartheta} \frac{t_{Z1}}{П_1} = \frac{440 \cdot 10^2 \cdot 4{,}6 \cdot 10^6}{46 \cdot 10^6} \frac{3{,}14 \cdot 10^{\ 2}}{16{,}26 \cdot 10^{\ 2}} = 849{,}7 \text{ Вт/м}^2.$$

Удельная проводимость меди при 75⁰ С $\gamma_\vartheta = 46 \cdot 10^6$ Ом/м; периметр паза (без учета клина) по рис. 10.44 $П_1 = 16{,}26 \cdot 10^{\ 2}$ м .

146. Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха по (10.172)

$$\Delta\vartheta_л = \frac{q_л}{1{,}33(1 + 0{,}07 v_p)} = \frac{849{,}7}{13{,}3(1 + 0{,}07 \cdot 23{,}6)} = 24{,}1^0 C.$$

147. Перепад температуры в пазовой изоляции обмотки статора (см. п. 30)

$$\Delta\vartheta_{из} = 11^0 C.$$

148. Среднее превышение температуры обмотки статора по (10.173)

$$\Delta\vartheta_{об.с} = \frac{(\Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_{пов.с}) l_1 + (\Delta\vartheta_{из} + \Delta\vartheta_л) l_л}{l_1 + l_л} = \frac{(11 + 38{,}6)0{,}36 + (11 + 24{,}1)0{,}385}{1{,}49/2} = 42{,}1^0 C.$$

Характеристики двигателя

149. Статическая перегружаемость по (10.176)

$$\frac{M_{\max}}{M_{ном}} = \frac{E_0'}{x_d \cdot \cos\varphi_{ном}} k_{р.с} = \frac{2{,}7}{1{,}317 \cdot 0{,}9} 1{,}02 = 2{,}32 .$$

При МДС обмотки возбуждения $F_{fном*} = 2{,}12$ по продолжению прямолинейной части характеристики холостого хода находим $E_{0*}' = 2{,}7$. По рис. 10.43 при

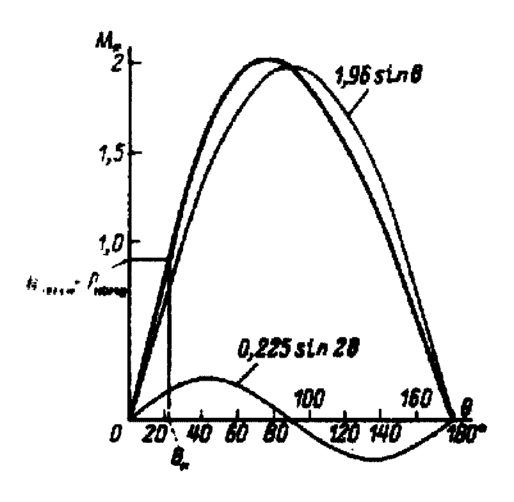


Рис. 10.50. Угловая характеристика

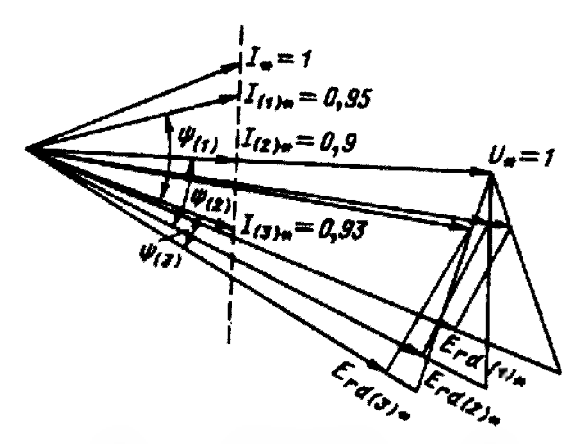


Рис.10.51. Векторные диаграммы (к построению U-образных характеристик)

$$\frac{x_{d*}-x_{q*}}{E'_{0*}x_{q*}}=\frac{1{,}317-0{,}828}{2{,}7\cdot 0{,}828}=0{,}22$$

находим $k_{р.с}=1{,}02$.

150. Угловая характеристика $M_*=f(\theta)$ по (10.174)

$$M_*=\frac{E'_{0*}}{x_{d*}}\sin\theta+\frac{1}{2}\left(\frac{1}{x_{q*}}-\frac{1}{x_{d*}}\right)\sin 2\theta=\frac{2{,}7}{1{,}317}\sin\theta+\frac{1}{2}\left(\frac{1}{0{,}828}-\frac{1}{1{,}317}\right)\sin 2\theta=2{,}05\sin\theta+0{,}224\sin 2\theta.$$

Построенная по этому уравнению характеристика дана на рис. 10.50.

151. U-образные характеристики $I_*=f(I_{f*})$ построены по векторным диаграммам для трех значений мощности $P_{1*}=0{,}9;0{,}5$ и $0{,}2$ (за базовое значение мощности принята мощность

$$S_{ном}=mU_{ном.ф}I_{ном.ф}\cdot 10^{-3}=3\cdot 3468\cdot 57{,}1\cdot 10^{-3}=593 \text{ кВ·А};$$

за базовое значение тока якоря принят номинальный ток $I_{ном.ф}=57{,}1$ А).

При $P_{1ном}(P_{1*ном}=\cos\varphi_{ном}=0{,}9)$ векторные диаграммы для трех значений тока $I_{(1)*}=0{,}95; I_{(2)*}=0{,}9$; и $I_{(3)*}=0{,}93$ представлены на рис. 10.51.

Расчетные значения, необходимые для построения векторных диаграмм и определения тока возбуждения, сведены в табл. 10.18 (в относительных единицах).

Ток возбуждения I_{f*}, соответствующий номинальному току якоря при $P_{1ном}$, был определен раньше (по рис. 10.49). Для других значений мощности U-образные харапктеристики строятся аналогично. Характеристики приведены на рис. 10.52.

152.Рабочие характеристики $I,P,M,\cos\varphi,\eta=f(P_2)$ при $I_{fном*}=2{,}12$ даны на рис. 10.53.

Из рис. 10.52. при $I_{fном}$ находим токи якоря: $P_{1ном}=0{,}9(535\text{ кВт})$ ток $I*=1$ (57,1 А), для $P_{1*}=0{,}5$

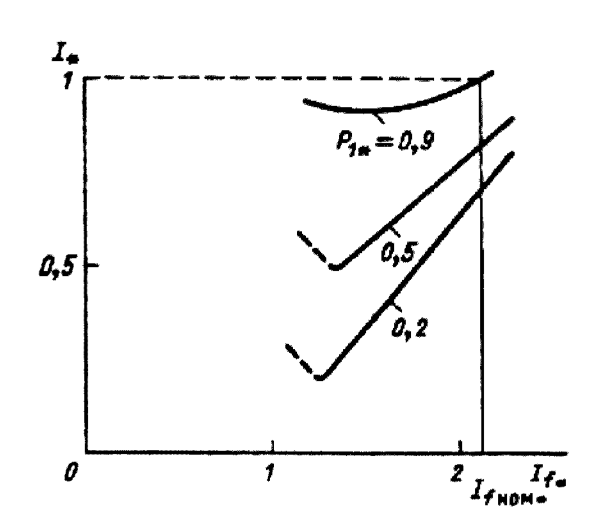


Рис. 10.52. U-образные характеристики

Таблица 10.18. **Расчетные значения, необходимые для построения векторных диаграмм и определения тока возбуждения**

I_*	$E_{\delta*}$	$\frac{F_{\delta Za}}{F_\delta}$	$\tilde{K}$	$\tilde{k}_d$	$\tilde{k}_q$	$k_q k_{ad} F_{a*}$	$\frac{E_{aq*}}{\cos\psi}$	E_{rd*}
0,95	1,05	1,35	0,0024	0,935	0,67	0,30	0,45	1
0,9	1,02	1,25	0,0022	0,94	0,74	0,32	0,47	0,93
0,93	0,98	1,2	0,0021	0,945	0,76	0,34	0,5	0,9

F_{rd*}	ψ	F''_{ad*}	$F''_{ad*}+F_{rd*}$	$\Phi_{\sigma*}$	$\Phi_{rd*}+\Phi_{\sigma*}$	F_{mj*}	$F_{f*}=I_f$
0,80	37	0,619	1,479	0,35	1,35	0,35	1,829
0,72	25	0,51	1,23	0,3	1,23	0,25	1,48
0,64	17	0,42	1,06	0,25	1,15	0,22	1,28

Таблица 10.19. **Расчет рабочих характеристик**

P_{1*}	P_1, кВт	I_{1*}	I_1, А	$\cos\varphi=\frac{P_1}{mU_{ном.ф}I_1}$	$P_{Э1}$, кВт	$P_{ДОБ}$, кВт	$\sum P$, кВт	$\eta=1-\frac{\sum P}{P_1}$	$P_2=P_1-\sum P$, кВт	$M=9550\frac{P_2}{n_{ном}}$, Н·м
0,9	535	1	57,1	0,9	8,9	2,67	30,21	0,94	504,79	9641
0,5	297	0,82	47	0,61	6,03	1,81	26,48	0,91	270,52	5167
0,2	119	0,7	40	0,285	4,36	1,31	24,31	0,8	94,69	1808,5

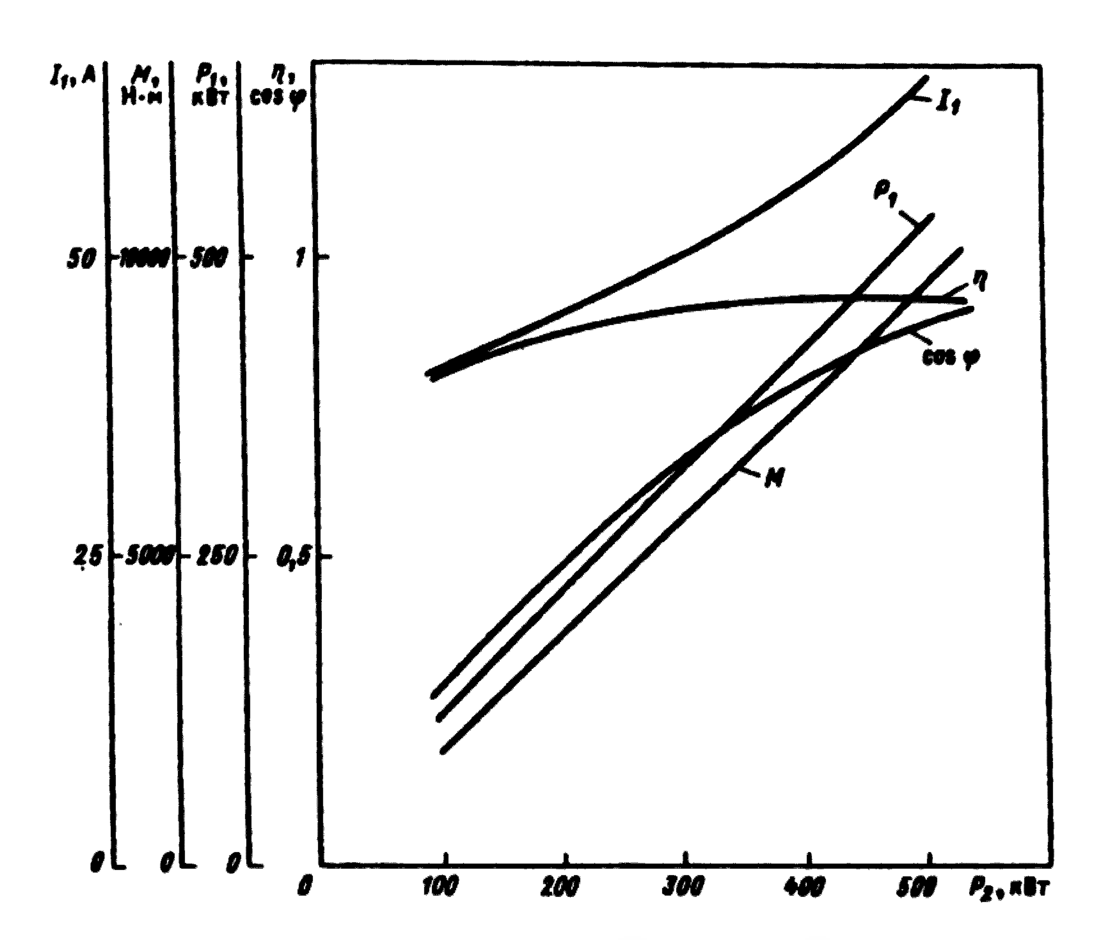


Рис. 10.53. рабочие характеристики двигателя при $I_{fном}$

(297 кВт) ток $I^* = 0{,}82$ (47 А), для $P_{1*} = 0{,}2$ (119 кВт) ток $I^* = 0{,}70$ (40 А). Расчет рабочих характеристик приведен в табл. 10.19. При расчете потерь $\sum P$ пересчитываются электрические потери в обмотке статора и добавочные потери (пропорцианально I^2). Остальные потери принимаются неизменными.

153. Пусковые характеристики. Ранее для пусковой обмотки были выбраны круглые медные стержни. Проведенный расчет пусковых характеристик показал, что в этом случае получается низкий пусковой момент $(M_{n*} = 0{,}61)$. В целях повышения пускового момента заменяем четыре медных стержня из шести на латунные тогоже размера. Проведем пересчет активных сопротивлений пусковой обмотки.

Активное сопротивление пусковой обмотки по продольной оси по (10.136)

$$r_{kd*} = \frac{2{,}16}{10^8}\frac{F_{aном}}{f\Phi_\delta}\frac{1}{1-k_B}\left[\frac{c'_c c''_c l_c}{(c''_c N'_c + c'_c N''_c)q_c} + \frac{c_{к.з}\tau C_d}{q_{к.з}N_c}\right] = \frac{2{,}16}{10^8}\frac{4250}{50\cdot 0{,}0454}\frac{1}{1-0{,}4}\left[\frac{1\cdot 4\cdot 43\cdot 10^{\ 2}}{(4\cdot 2+1\cdot 4)\cdot 113\cdot 10^{\ 6}} + \frac{1\cdot 23{,}6\cdot 10^{\ 2}\cdot 1}{349{,}1\cdot 10^{\ 6}\cdot 6}\right] = 0{,}092$$

где $c'_c = 1, c''_c = 4$.

Активное сопротивление пусковой обмотки по поперечной оси по (10.137)

$$r_{rq*} = \frac{2{,}16}{10^8}\frac{F_{aном}}{f\Phi_\delta}\frac{1}{1+k_B}\left[\frac{c'_c c''_c l_c}{(c''_c N'_c + c'_c N''_c)q_c} + \frac{c_{к.з}\tau C_q}{q_{к.з}N_c}\right] = \frac{2{,}16}{10^8}\frac{4250}{50\cdot 0{,}0454}\frac{1}{1+0{,}4}\left[\frac{1\cdot 4\cdot 43\cdot 10^{\ 1}}{(4\cdot 2+1\cdot 4)\cdot 113\cdot 10^{\ 5}} + \frac{1\cdot 23{,}6\cdot 10^{\ 2}\cdot 1{,}7}{349{,}1\cdot 10^{\ 6}\cdot 6}\right] = 0{,}037$$

Таблица 10.20. **Расчет пусковых характеристик**

Параметр	Скольжение s				
	1	0,5	0,2	0,1	0,05
$Y_{fc} = \dfrac{1}{r'_{f\ s} + jx_{\sigma f}} = \dfrac{r'_{f\ s} - jx_{\sigma f}}{(r'_{f\ s})^2 + x_{\sigma f}^2}$	0,382—j3,15	0,76—j3,13	1,42—j2,34	1,59—j1,31	1,12—j0,46
$Y_{kds} = \dfrac{1}{r_{kd\ s} + jx_{kd}} = \dfrac{r_{kd\ s} - jx_{kd}}{(r_{kd\ s})^2 + x_{kd}^2}$	3,75—j5,16	3,68—j2,52	2,03—j0,67	1,06—j0,145	0,54—j0,037
$Y'_{ds} = \dfrac{1}{jx_{ad}} + Y_{fs} + Y_{kds}$	4,13—j9,15	4,44—j6,49	3,45—j3,74	2,65—j2,295	1,66—j1,34
$Z'_{ds} = \dfrac{1}{Y'_{ds}}$	0,041+j0,09	0,07+j0,105	0,13+j0,14	0,22+j0,187	0,36+j0,29
$Z_{ds} - jx_{\sigma} + Z'_{ds}$	0,041+j0,22	0,07+j0,235	0,13+j0,27	0,22+j0,317	0,36+j0,42
$\dfrac{1}{Z_{ds}}$	1,02-j5,5	1,17-j3,92	1,45-j3	1,49-j2,14	1,2-j1,4
$Y_{kqs} = \dfrac{1}{r_{kqls} + jx_{kq}} = \dfrac{r_{kqls} - jx_{qd}}{(r_{kqls})^2 + x_{kq}^2}$	8-j12,34	8,49-j6,54	4,94-j1,52	2,16-j0,33	1,34-j0,103
$Y' = \dfrac{1}{jx_{aq}} + Y_{kqs}$	8-j13,76	8,49-j7,98	4,94-j2,96	2,16-j1,77	1,34-j1,54
$Z'_{qs} = \dfrac{1}{Y'_{qs}}$	0,0316+ j0,0543	0,0625+ j0,058	0,185+j0,11	0,28+j0,23	0,32+j0,37
$Z_{qs} = jx_{\sigma} + Z'_{qs}$	0,0316+ j0,1843	0,0625+ j0,188	0,185+j0,24	0,28+j0,36	0,32+j0,5
$\dfrac{1}{Z_{qs}}$	0,9-j5,27	1,6-j4,82	2-j2,6	1,35-j1,73	0,9-j1,43
$\dot{I}' = \left(\dfrac{1}{Z_{qs}} + \dfrac{1}{Z_{ds}}\right)/2 = I'_a - jI'_p$	0,96-j5,385	1,385-j4,37	1,73-j2,8	1,42-j1,93	1,05-j1,41
$\dot{I}'' = \left(\dfrac{1}{Z_{qs}} - \dfrac{1}{Z_{ds}}\right)/2 = I''_a - jI''_p$	-0,03-j0,115	0,107-j0,23	0,14+j0,1	-0,0035+j0,1	-0,075-j0,005
I'	5,47	4,65	3,3	2,4	1,76
I''	0,119	0,253	0,172	0,105	0,0754
$I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2}$	5,48	4,67	3,31	2,4	1,76
$M = I'_a / \cos\varphi_{ном}$	1,07	1,54	1,92	1,58	1,17

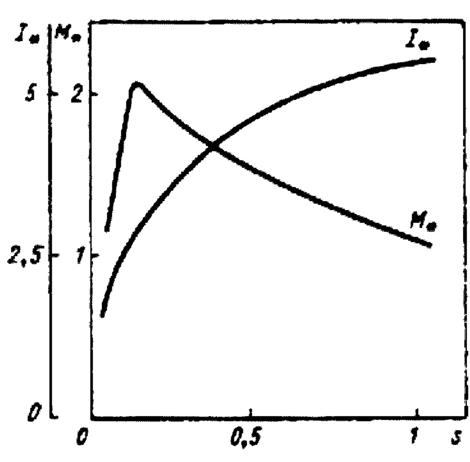


Рис. 10.54. Пусковые характеристики

Параметры (в относительных единицах), необходимые для расчета пусковых характеристик,

$r'_{f*} = 0{,}038$; $x_{\sigma f*} = 0{,}313$; $x_{kd*} = 0{,}126$;

$x_{kd*} = 0{,}057$; $r_{kd*} = 0{,}092$; $r_{kd*} = 0{,}037$;

$x_{\sigma *} = 0{,}13$; $x_{ad*} = 1{,}187$; $x_{aq*} = 0{,}697$.

Расчет пусковых характеристик сведен в табл. 10.20. По данным этой таблицы построены характеристики на рис. 10.54.

Начальный пусковой момент $M_{n*} = 1{,}07$.

Начальный пусковой ток $I_{n*} = 5{,}48$.

Вывод: спроектированный двигатель удовлетворяет ГОСТ и заданию на проектирование.

Глава одиннадцатая.
Проектирование машин постоянного тока

Машины постоянного тока общего назначения выпускают серийно. Создание каждой новой серии представляет собой сложную научно-техническую и экономическую задачу, решение которой ведется на основе глубокого анализа тенденций развития электромашиностроения и прогнозов показателей технического уровня разрабатываемых машин, а также достижений в области проектирования и технологии. В серии должны быть учтены требования международной стандартизации и приняты рациональные принципы увязки мощностей с высотой оси вращения.

11.1. СЕРИИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Первая общесоюзная серия машин постоянного тока была создана в 1956 г. Она была названа серией П. В этой серии впервые была установлена нормализованная шкала номинальных мощностей и номинальных частот вращения машин. Машины серии П состояли из трех групп конструктивно подобных отрезков серии: машины мощностью от 0,3 до 200 кВт (1—11-й габариты), машины мощностью 200—1400 кВт (12—17-й габариты) и машин мощностью свыше 1400 кВт (18—26-й габариты).

Габарит машины определяется диаметром якоря, который нормализован. Для каждого габарита устанавливают две длины сердечника. Исполнение двигателей единой серии П от 1-го до 11-го габарита по степени защиты соответствует IP22, по способу охлаждения - IC01 или IC05. Возбуждение смешанное. На рис. 11.1 приведена типичная для этой серии конструкция электрической машины.

Серия 2П, созданная к 1974 г., приблизительно через 20 лет после создания первой серии П, спроектирована в полном соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК).

Эта серия машин имеет следующие особенности:

принята единая шкала номинальных высот оси вращения машины;

установочные размеры машины (рис. 11.2) однозначно увязаны с высотой оси вращения, но не определяются мощностью машины;

для каждой высоты оси вращения приняты три значения длины, которым соответствуют три обозначения длины станины; S — для коротких, M — средних и L — длинных машин.

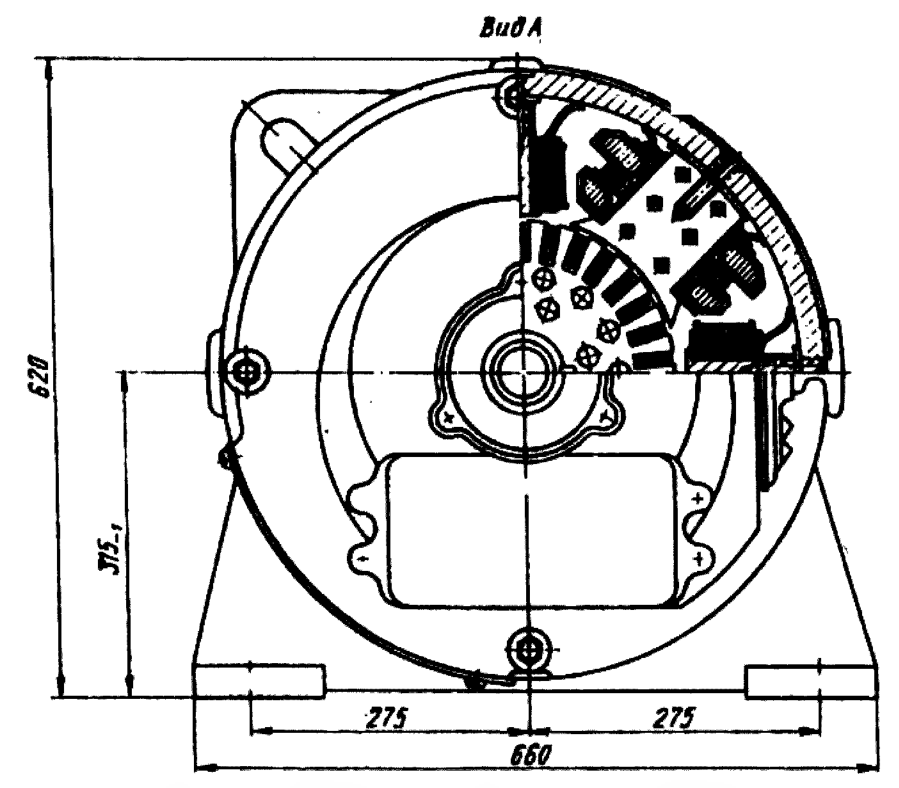


Рис. 11.1. Машина постоянного тока типа П-92:

1, 5, 16, 18 – крышки подшипников; *2* – передний щит; *3* – траверса; *4* – шарикоподшипник; *6* – крышка подшипникового щита; *7* – коллектор; *8* – станина; *9* – добавочный полюс; *10* – якорь; *11* – главный полюс; *12* – шайба на валу; *13* – задний щит; *14* – вентилятор; *15* – болт; *17* – роликоподшипник; *19* – вал; *20* – шпонка; *21* – жалюзи

Установочные размеры электрических машин приведены в табл. П6.2 и П6.3. Принятые обозначения размеров: h — высота оси вращения от нижней опорной поверхности лап до оси вала; b_{10} — расстояние между отверстиями под болты в лапах (торцевой вид); l_{10} расстояние от оси отверстия в лапе машины до упора (заплечика) свободного конца нала; d_1 — диаметр основного свободного конца вала; d_{10} — диаметр отверстий под болты в лапах машин.

Размеры l_1 и d_1 свободного конца вала не связывают с высотой оси вращения, а выбирают в зависимости от наибольшего длительного вращающего момента двигателя согласно табл. П6.4; размеры шпонки и шпоночных канавок связаны с размерами l_1 и d_1.

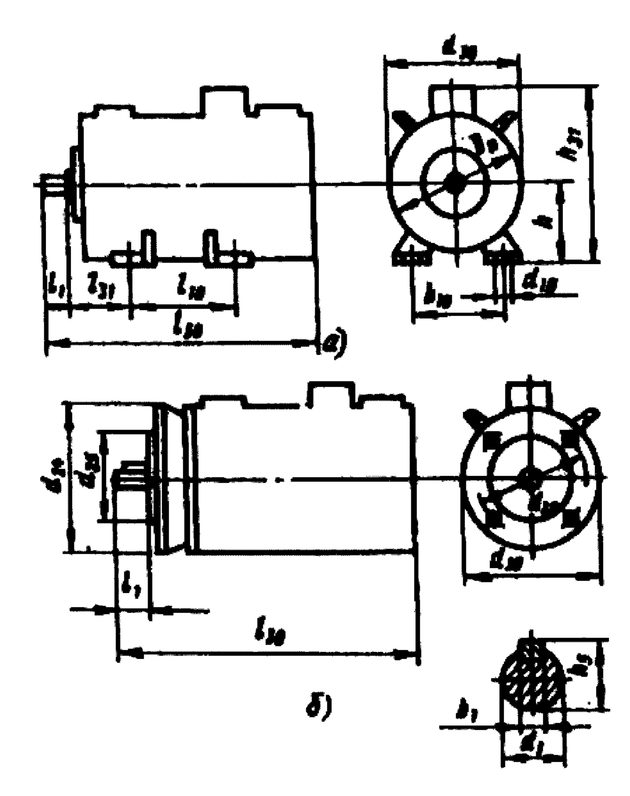


Рис. 11.2. Установочные размеры машины постоянного тока серии 2П:

а – исполнение IM1001;
б – исполнение IM3101

Диаметры крепительных фланцев, регламентированные МЭК, приведены в табл. П6.5, а обозначения размеров — на рис. 11.2.

Двигатели серии 2П имеют следующие степени защиты (по ГОСТ 17494—87):

IP22 — с самовентиляцией (типа 2ПА), независимой вентиляцией от постороннего вентилятора (типа 2ПН);

IP44 — закрытое исполнение с естественным охлаждением (типа 2ПВ) и закрытое исполнение с наружным обдувом от постороннего вентилятора (типа 2ПО).

Номинальные мощности соответствующих серий приведены в [16].

Формы исполнения двигателей серии 2П в зависимости от габаритов даны в табл. 11.1.

Таблица 11.1. **Формы исполнения двигателей серии 2П**

Формы исполнения	Диапазон габаритов
IM1001, IM1011, IM1031	112,132,160,180,200
IM2101, IM2111, IM2131	180 и 200
IM3601, IM3611, IM3631	112.132.160.180.200

Двигатели серии 2П предназначены для работы как, от источников постоянного тока, так и от тиристорных преобразователей. Номинальные

напряжения якорной цепи 110, 220,440, 600 В. Возбуждение независимое, номинальное напряжение возбуждения 110 и 220В.

Двигатели мощностью до 200 кВт выпускают с номинальными частотами вращения 750, 1000, 1500, 2200, 3000 об/мин. Частота вращения двигателей может регулироваться как изменением напряжения якорной цепи, так и ослаблением поля главных полюсов. Увеличение частоты ослаблением поля допускается до 3500 об/мин при номинальной частоте вращения 1500 об/мин или до 3000 об/мин при номинальной частоте вращения 1000 об/мин и ниже.

Двигатели серии 2П защищенного исполнения типов 2ПА и 2ПН выполняют с изоляцией класса нагревостойкости В, двигатели закрытого исполнения типов 2ПО и 2ПБ - с изоляцией класса нагревостойкости F.

Конструкция двигателя серии 2П приведена на рис. 11.3.

Корпус станины имеет цилиндрическую форму, изготовляется из стали марки Ст3. К корпусу винтами привернуты главные и дополнительные полюсы с обмотками. Главные полюсы набраны из штампованных листов электротехнической стали марок 3411, 3413 толщиной 0,5 или 1 мм. Пакеты листов полюсов скрепляют заклепками. Сердечники дополнительных полюсов также выполняют из электротехнической стали 3411 или другой марки толщиной 0,5 мм или 1 мм. При высотах оси вращения до 132 мм сердечники дополнительных полюсов выполняют из полосовой стали марки Ст3. Обмотка главных полюсов - многослойная из медного провода круглого сечения марки ПЭТВ. Обмотка дополнительных полюсов - из медного провода круглого сечения марки ПЭТВ или прямоугольного провода марки ПСД. Собранные катушки главных и дополнительных полюсов пропитывают в нагревостойких лаках, что обеспечивает их монолитность и влагостойкость, уменьшает внутреннее тепловое сопротивление катушки. Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов приведена в табл. 11.2—11.3.

Пакет якоря набирается из штампованных изолированных лаком листов электротехнической стали марок 2211, 2312, 2411, 3413 и др. толщиной 0,5 мм, напрессовывается непосредственно на вал и закрепляется между двумя нажимными кольцами, являющимися одновременно обмоткодержателями для лобовых частей обмотки якоря.

В пазы сердечника якоря укладывают обмотку. При диаметрах якоря до 200 мм пазы выполняют полузакрытыми овальной формы, зубцы с параллельными стенками. Обмотка якоря в этих случаях - всыпная из эмалированных медных проводников круглого сечения, образующих мягкие секции, которые легко можно уложить в пазы через сравнительно узкие шлицы.

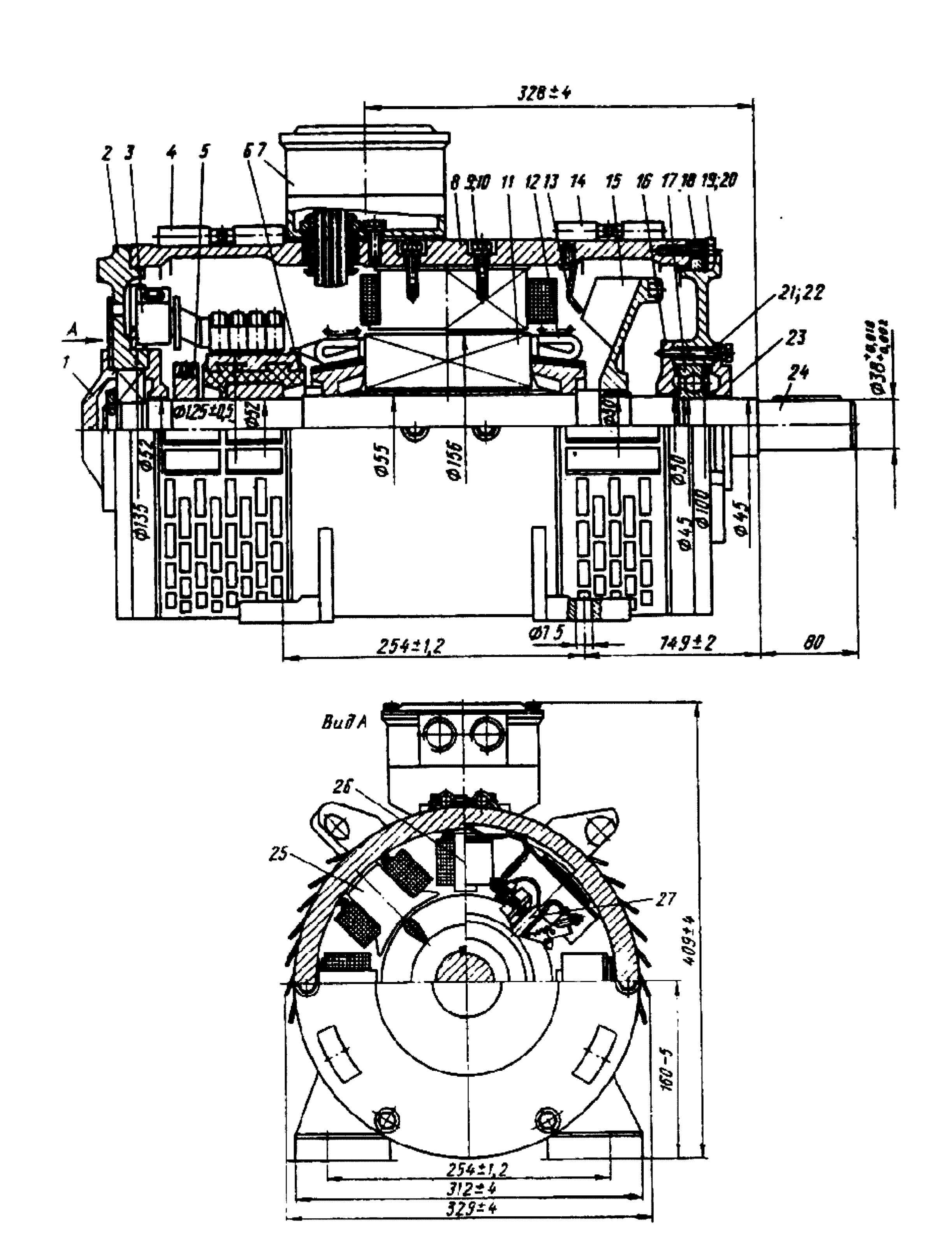
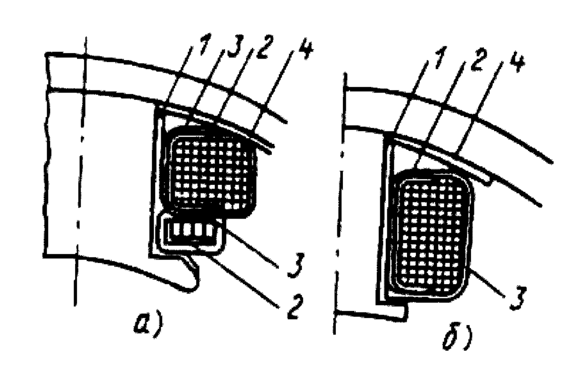


Рис. 11.3. Машина постоянного тока типа 2П-160М:
1,16,23 — крышки подшипников; *2* — щит подшипниковый; *3* — траверса; *4* — лента защитная; *5* — балансировочное колесо; *6* — коллектор; *7* — коробка выводов; *8* — станина; *9* — болт; *10* — шайба; *11* — якорь; *12* — обмотка якоря;
13 — диффузор; *14* — защитная лента; *15* — вентилятор; *17* — шарикоподшипник; *18* — подшипниковый щит; *19* — болт М10; *20* — шайба М10; *21* — болт М6; *22* — шайба М6; *24* — вал; *25* — главный полюс; *26* — дополнительный полюс; *27* — щетки

Таблица 11.2. **Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока**

(h = 80...200 мм, напряжение до 600 В)



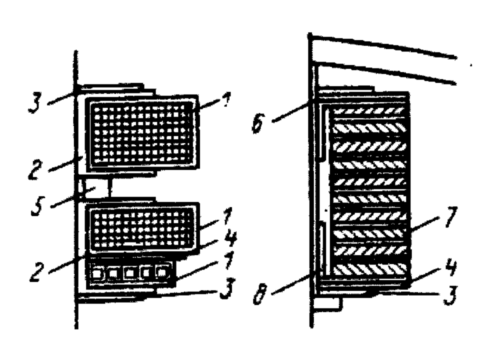
Позиция	Назначение	Материал			Толщина, мм	Число слоев
		Наименование, марка				
		Класс нагревостойкости				
		B	F	H		
1	Изоляция сердечника (напыление)	Эпоксидная смола			1	—
2	Изоляция катушки	Лакотканеслюдопласт			0,25	1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ		
3	Тоже	Стеклянная лента ЛЭС			0,1	1 вполнахлеста
4	Рамка	Стеклотекстолит			0,5	1
		СТ	СТЭФ	СТК		

В серийных машинах мощностью более 30 кВт обмотку якоря выполняют из прямоугольных обмоточных проводников в виде формованных жестких секций. Все секции, принадлежащие одной катушке, изолируют общей пазовой изоляцией и укладывают в пазы прямоугольной формы, что обеспечивает хорошее использование площади паза и снижает трудоемкость обмоточных работ. Пазовую изоляцию обмоток с мягкими и жесткими секциями выполняют согласно данным в табл. 11.4—11.6.

Обмоткодержатели крепят следующим образом: один упирается в уступ на валу, а другой запирается кольцом, насаженным на вал по горячей посадке. Вал из стали марки 45 имеет ступенчатую форму для раздельной посадки на него сердечника якоря, коллектора и вентилятора.

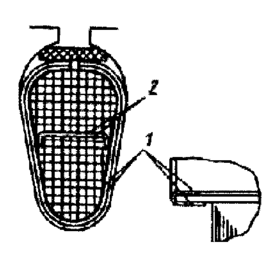
Коллектор состоит из коллекторных пластин, изолированных друг от друга слюдяными пластинами, являющимися межламельной изоляцией. При наружном диаметре коллектора до 250 мм коллекторные пластины закрепляют пластмассой, которую впрессовывают во внутреннее отверстие между пластинами и коллекторной втулкой, предназначенной для посадки коллектора на вал. В качестве армирующей пластмассы используют пластмассу АГ-4С или К6.

Таблица. 11.3. **Изоляция обмоток главных и добавочных полюсов машин постоянного тока (h = 225...315 мм, напряжение до 600 В)**



Позиция	Назначение	Материал			Толщина, мм		Число слоев
		Наименование, марка					
		Класс нагревостойкости			Класс нагревостойкости		
		B	F	H	B	F,H	
1	Изоляция катушки	Стеклянная лента ЛЭС			0,1		1 вполнахлеста
2	Каркас	Стеклолакоткань			2		1
		ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	ГИП-ЛСП-ЛСЛ	ГИК-ЛСК-ЛСЛ			
3	Рамка	Сталь Ст3				1,5	1
		Стеклотекстолит			0,5		1
4		СТ	СТЭФ	СТК			
5	Скоба	Сталь Ст3			8—10		1
6	Изоляция сердечника	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F	Синтофолий H	0,16		7,5
7	Прокладка междувитковая	Асбестовая бумага	Фенилоновая бумага 0,2 мм		0,2×2		1
8	Изоляция углов	Стеклянная лента ЛЭС					1 вполнахлеста

Таблица 11. 4. **Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы овальные полузакрытые, обмотка двухслойная всыпная из круглого эмалированного провода, напряжение до 600В)**



Высота оси ращения	Позиция на рис.	Материал		Толщина, мм	Число слоев	Односторонняя
		Наименование, марка				
		Класс нагревостойкости				
		B	F | H			
		Пленкостеклопласт				
80-112	1 2	Изофлекс	Имидофлекс	0,35 0,35	1 1	0,35 0,35
		Пленкостеклопласт				
132-200	1 2	Изофлекс	Имидофлекс	0,25 0,25	2 2	0,25 0,25

Примечание. Прокладку между катушками в лобовых частях обмотки выполняют из изофлекса.

Концы обмоток якоря впаивают в петушки коллекторных пластин. Траверса щеткодержателей крепится с помощью болтов к подшипниковому щиту со стороны коллектора. Щеткодержатели изолированы от подшипниковых щитов текстолитовыми кольцами. Аксиальную принудительную вентиляцию двигателя осуществляют со стороны привода. Воздух забирается через жалюзи, выполненные в защитной ленте со стороны коллектора, и выбрасывается через отверстия в защитной ленте со стороны привода (выходного вала). Для рационального распределения охлаждающего воздуха над активными частями машины предусмотрен диффузор.

Со стороны коллектора на валу предусмотрено балансировочное кольцо. В подшипниковых щитах со стороны привода и со стороны коллектора установлены шариковые или роликовые подшипники. Концы обмоток якоря и возбуждения выводят к болтам панели, размещенной в коробке выводов.

В конце 70-х годов было начато проектирование ив 1984 г. завершено освоение новой серии 4П двигателей постоянного тока, на базе которых создаются

регулируемые электроприводы с высокими динамическими и эксплуатационными показателями для нужд станкостроения и других областей машиностроения. Двигатели серии III имеют диапазон регулирования частоты вращения 1:5 при регулировании магнитным потоком двигателя и 1:1000 при тиристор-ном регулировании напряжения в цепи якоря [5, 16].

Конструктивно эти двигатели выполнены закрытыми, со степенью защиты IP44, с полностью шихтованным магнитопроводом стартера, запрессованным в круглый чугунный или алюминиевый корпус. Способ охлаждения — IC0041 (без вентиляции) или IC0141 с поверхностным охлаждением посредством вентилятора, установленного на валу двигателя. При прямоугольном сечении пакета статора двигатели выполняют без корпуса, способ охлаждения — IC06 или IC05.

По условиям эксплуатации серия 4П выпускается для нормальных условий и для тяжелых условий эксплуатации, соответствующих их работе в механизмах экскаваторов, буровых установок, в оборудовании металлургического производства, в крановом оборудовании и др. Структура серии 4П приведена в табл. 10.7.

Закрытые и обдуваемые двигатели мощностью до 10 кВт с регулированием частоты вращения магнитным потоком составляют почти 2/3 общей потребности народного хозяйства в машинах постоянного тока.

Для повышения технологичности конструкции двигателей серии 4П и использования в их производстве технологического оборудования, созданного под серию 4А асинхронных двигателей, магнитопровод статора этих машин унифицирован с пакетом статора асинхронных машин. При такой конструкции магнитопровода статора машин серии 4П обмотка возбуждения укладывается в два паза в пределах полюсной дуги основного потока, а во всех остальных пазах равномерно располагается компенсационная обмотка. Распределение обмоток возбуждения и компенсационной обмотки в пазах магнитопровода статора позволяет обеспечить полную компенсацию реакции якоря не только в режимах номинальной нагрузки, но и при больших кратностях перегрузки по току якоря.

Распределение обмоток по пазам статора одновременно улучшает теплоотдачу обмоток, позволяет увеличить плотность тока в обмотках возбуждения, компенсационной и добавочных полюсов и довести их до уровней, установленных для статорных обмоток асинхронных машин. При применении шихтованного магнитопровода статора машин постоянного тока уменьшается магнитная несимметрия и повышается коммутационная надежность двигателей в стационарных и динамических режимах, улучшаются динамические показатели машины при питании от тиристорных преобразователей напряжения.

Таблица 11.5. **Изоляция обмотки якоря машин постоянного тока (пазы открыты, обмотка из прямоугольного провода, h= 225...315 мм, напряжение 600 В)**

Часть обмотки	Позиция на рис.	Материал, марка			Толщина, мм		Число слоев			Двусторонняя толщина изоляции			
		Класс нагревостойкости					Класс нагревостойкости		по ширине	по высоте при w_C			
		B	F	H	B	F,H	B	F,H		1	2	3	4
Пазовая	*1*	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F	Синтофолий H	0,15	0,16	4,5 оборота	3,5 оборота	1,1	2,2	2,2	2,2	2,2
	2	То же	То же	То же	0,15	0 ,16	0—6				0,3	0,6	0,9
	3	Стеклолакоткань ЛСП			0,15		1	1	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6
		Стеклотекстолит											
	4	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
	5	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
	6	СТ	СТЭФ	СТК	0,5		1	1		0,5	0,5	0,5	0,5
		Допуск на укладку обмотки							0,3	0,5	0,5	0,5	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина или без высоты бандажной канавки)							1,7	4,8	5,1	5,4	5,7
Лобовая	*7*	Стеклослюдинитовая лента	Пленка полиамидная марки ПМ 0,05×3		0,15		1 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	8	Стеклянная лента ЛЭС			0,1		То же	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)						1	1	1	1	1	1

Эти двигатели допускают работу без включения в цепь якоря дополнительного сглаживающего реактора. При номинальной мощности допустима пульсация тока до 15%, а при увеличении коэффициента пульсации до 45% мощность двигателя должна быть снижена на 10%.

На рис. 11.4 показана конструкция двигателя постоянного тока типа 4ПО, в которой детали и узлы максимально унифицированы с конструкциями асинхронных машин. Приняты одинаковыми внешние диаметры пакетов стали статоров и длины пакетов в обеих конструкциях. Подшипниковые щиты на стороне, противоположной коллектору, станины, коробки выводов, вентиляционные и подшипниковые узлы, используемые в конструкциях серии 4А, могут быть применены в двигателе серии 4П. Поэтому операции штамповки листов, сборки пакетов статора и ротора, запрессовки их в станину и на вал осуществляются на оборудовании, предназначенном для производства асинхронных двигателей.

Воздушный зазор в рассматриваемых конструкциях выполняется равномерным, без увеличения его под краями главных полюсов. Исполнение двигателя по степени защиты IP44 повышает надежность этих двигателей в эксплуатации.

Конструкция изоляции обмоток якоря и статора двигателей серии 4П соответствует изоляции асинхронных машин серии 4А и машин постоянного тока серии 2П. Класс нагревостойкости изоляции обмоток: F — для магнитной системы и H — для якоря.

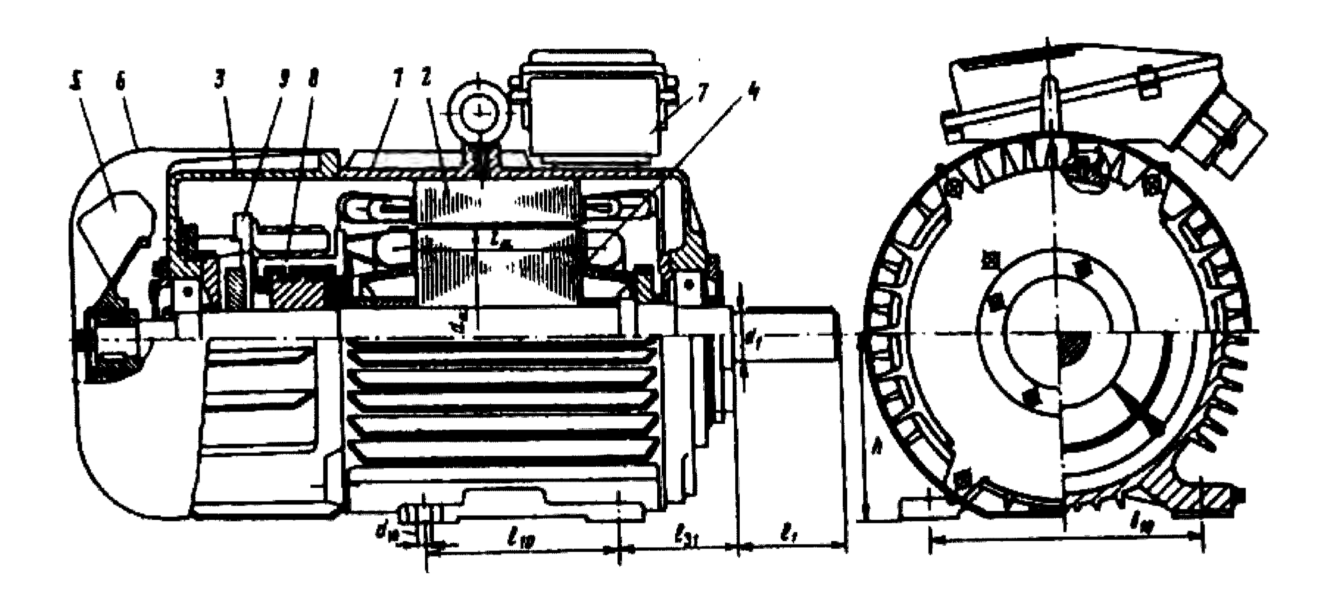


Рис. 11.4. Машина постоянного тока серии 4П:
1 корпус; *2* — магнитопровод статора; *3* — щит подшипниковый передний;
4 сердечник якоря; *6* - кожух, *7* – коробка выводов; *8* — коллектор; *9* — токосъемное устройство

Таблица 11.6. **Изоляция обмотки якоря двигателей постоянного тока (пазы прямоугольные, открытые, обмотки двухслойная петлевая, волновая, лягушачья разрезная с жёсткими формированными катушками из провода марки ПСД (Класс нагревостойкости F) и ПСДК (Класс нагревостойкости H), h=355…500 мм, напряжение 1000В.**

Часть обмотки	Позиция	Материал. Наименование, марка. Класс нагревостойкости		Толщина, мм		Число слоев. Класс нагревостойкости		Двусторонняя толщина изоляции, мм. по ширине				по высоте
		F	H	F	H	F	H	2	3	4	5	
Пазовая	*1*	Стеклянная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,02	0,2	0,4	0,4	0,8
	2	Бумага фенилоновая	—	0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,4
	3	Полиимидная пленка	ПМ	0,05		3 вполнахлеста		0,6	0,6	0,6	0,6	1,2
	4	Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1	0,1	0,1	0,2
	5	Стеклянная лента ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4	0,4	0,4	0,8
	6	Бумага фенилоновая		0,2		1		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	7	Стеклостекстолит	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	8	То же	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
	9	«	СТК	0,5		1		—	—	—	—	0,5
		Допуск на укладку	—	—		—		0,3	0,3	0,3	0,3	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без витковой, без высоты клина)		—		—		2,1	2,1	2,3	2,3	5,8

Стеклянная лента ЛЭС	Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,05	1 впритык	1 вполнахлеста	0,2	0,2
Бумага фенилоновая		0,5		1 впритык		0,1	0,1
Полиимидная пленка ПМ		0,05		1 вполнахлеста		0,4	0,4
Бумага фенилоновая		0,05		1 впритык		0,1	0,1
Стеклянная лента ЛЭС		0,1		1 вполнахлеста		0,4	0,4
Общая толщина изоляции катушки в лобовой части (без витковой)		—	—			1,2	1,2

Таблица 11.7. **Структура двигателей серии 4П**

Исполнение	Тип	Высота оси вращения, мм	Номинальный вращающий момент, Н-м	Способ охлаждения	Степень защиты
Закрытые обдуваемые с нормальным регулированием	4ПО	80	2,3	IC0141	IP44
			3,5		
			4,7		
		100	5,6		
			7,1		
			9,5		
		112	14		
			19		
		132	25		
			35		
		160	47		
Закрытые с естественным охлаждением	4ПБ	100	1,2	IC0041	IP44
			1,6		
			2,4		
		112	7,1		
			9,5		
		132	14		
			19		
		160	25	IC0041	
			35		
Широкорегулируемые с принудительной вентиляцией	4ПФ	112	53	IC05, IC06	IP23
			71		
		132	95		
			118		
			140		
		160	190		
			236		
			280		
		180	355		
			475		
		200	560		
			710		
		225	850		
			1000		
			1250		
		250	1500		
		280	1700	IC06	
			2120		
Крупные двигатели для тяжелых условий эксплуатации		355	3000		IP23
			3750		
			4750		
		450	6000		
			9500		
			15000		

Сравнение степени использования объема двигателей постоянного тока серии 4П и асинхронных двигателей серии 4А показывает, что мощность двигателя постоянного тока унифицированной конструкции равна приблизительно 2/3 номинальной мощности «синхронного двигателя серии 4А при той же высоте оси вращения. Однако по сравнению с двигателями серии 2П достигнуто значительное снижение расхода активных материалов на единицу мощности. Например, в диапазоне мощностей от 15 кВт до 20 кВт расход обмоточной меди в двигателях новой серии на 20...30 % меньше, чем в двигателях серии 2П [5, 16].

11.2. ЗАДАНИЕ НА ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В соответствии с государственными стандартами разработка любого изделия всех отраслей промышленности определяется техническим заданием, в котором устанавливаются основное назначение, технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования, предъявляемые к проектируемому изделию, соответствие его мировому техническому уровню.

В техническом задании на проектируемую машину постоянного тока указываются следующие данные:

номинальная мощность машины, кВт;,

номинальное напряжение сети, В;

номинальная частота вращения, об/мин;

род возбуждения;

исполнение по степени защиты, способу монтажа и способу охлаждения;

условия эксплуатации при воздействии климатических и механических факторов;

номинальный режим работы и допускаемое превышение температуры, класс изоляции по нагревостойкости;

диапазон регулирования частоты вращения путем изменения напряжения сети, ослабления поля главных полюсов;

массогабаритные характеристики;

требования к коммутации;

дополнительные требования, например, показатели надежности и долговечности, значения КПД при номинальном режиме и определенном коэффициенте нагрузки и др.

При задании указанных величин вся последовательность расчета и проектирования машины постоянного тока соответствует установленным практикой электромашиностроения принципам проектирования машин общего назначения. На основе электромагнитного, теплового и вентиляционного расчетов может быть спроектирована машина, соответствующая специальным требованиям к конструкции и ее характеристикам. Сравнение степени использования объема двигателей постоянного тока серии 4П и асинхронных двигателей серии 4А показывает, что мощность двигателя постоянного тока унифицированной конструкции равна приблизительно 2/3 номинальной мощности «синхронного двигателя серии 4А при той же высоте оси вращения. Однако по сравнению с двигателями серии 2П достигнуто значительное снижение расхода активных материалов на единицу мощности. Например, в диапазоне мощностей от 15 кВт до 20 кВт расход обмоточной меди в двигателях новой серии на 20...30 % меньше, чем в двигателях серии 2П [5, 16].

Курсовой и дипломный проекты следует рассматривать как творческое индивидуальное задание. При выполнении этих работ студент должен показать умение мыслить творчески, изобретательно и неординарно решать инженерные задачи, активно использовать полученные им в вузе теоретические знания, правильно разрешать возникающие противоречия и выбирать лучший вариант, удовлетворяющий всем требованиям технического задания.

11.3. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

По формуле «машинной постоянной» (1.1), устанавливающей связь между размерами машины и электромагнитными нагрузками, определяют произведение D^2l, где D — диаметр якоря и l — длина якоря. При расчете D^2l предварительно выбирают индукцию в воздушном зазоре B_δ и линейную нагрузку A. Для определения главных размеров D и l задаются либо отношением $\lambda = l/D$, либо одним из размеров. При проектировании машин первых серий и их модификаций не устанавливалась связь между диаметром машины и установочными размерами, поэтому выбор главных размеров машины определялся на основании рекомендаций, устанавливающих экономически целесообразные значения отношения $\lambda = l/D$. Полученные при расчете диаметры якоря округлялись до стандартного ближайшего значения, выбранного по шкале диаметров якорей серийных машин.

Машины постоянного тока современных серий имеют единую шкалу высот оси вращения. При заданной высоте оси вращения h внешний диаметр корпуса машины постоянного тока не может превышать размер $2h$. Обычно этот диаметр должен быть не более $D_{вн} = 2h - (8...10)\cdot 10^{-3}$ м.

По данным многих типов и конструкций машин постоянного тока относительная радиальная высота магнитной системы $(D_{вн} - D)/D = \mu$ является функцией числа полюсов. Область значений этой функции для различных чисел полюсов приведена на рис. 11.5. Пользуясь рис. 11.1 и рис. 11.5, можно определить предварительное значение диаметра якоря. Значение D необходимо уточнить после составления эскиза магнитной системы и межполюсного окна. Далее по постоянной Арнольда (1.1) и уточненному значению D устанавливают расчетную длину якоря l.

Так как традиционный способ определения главных размеров машины через отношение длины якоря к его диаметру более удобен, на рис. 11.6 приведены зависимости λ от диаметра якоря для машин постоянного тока серий 4П, 2П, П и ПН, полученные путем расчета указанного показателя реальных машин. При выборе отношения λ необходимо иметь в виду, что с увеличением длины машины уменьшается относительная длина лобовых частей, возрастает КПД, снижается момент инерции якоря,

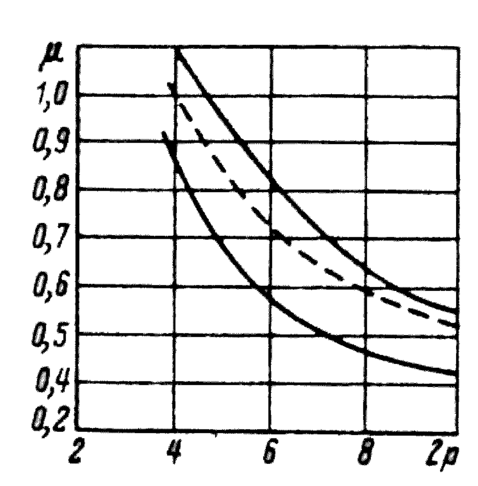


Рис. 11.5. К определению отношения внешнего диаметра машины к диаметру якоря

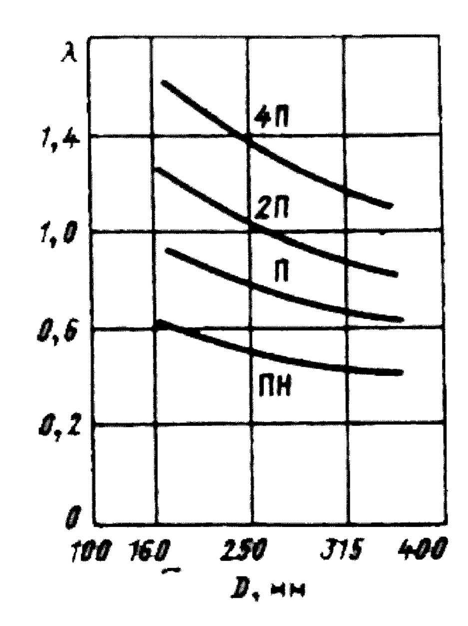


Рис. 11.6. Зависимость λ от диаметра якоря для машин различных серий

но при этом ухудшаются условия охлаждения и коммутации машины.

Электромагнитная мощность. В (1.1) в качестве расчетной принята электромагнитная мощность P'. Однако истинное значение электромагнитной мощности можно определить только после полного расчета электрической машины — на этапе расчета ее характеристик. Поэтому мощность P' определяют по номинальной (заданной) мощности $P_{ном}$ и предварительно принятому значению КПД.

Зависимость КПД от номинальной мощности для машин общего назначения приведена на рис. 11.7.

Для генераторов расчетная мощность принимается равной:

$$P' = k_г P_{ном}; \qquad (11.1)$$

для двигателей

$$P' = k_д P_{ном} / \eta_{ном} . \qquad (11.2)$$

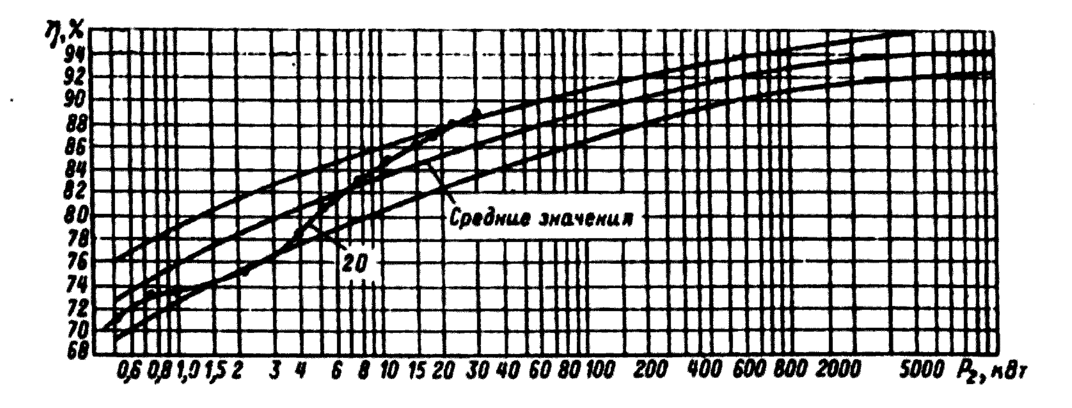


Рис. 11.7. Зависимость КПД машин постоянного тока от мощности машины

Значения коэффициентов $k_с$ и $k_Д$ приведены в табл. 11.8, там же даны значения коэффициента $k_В$ определяющего отношения тока возбуждения к току якоря.

Таблица 11.8. Значения коэффициентов $k_с$, $k_Д$, $k_В$

Мощность машины, кВт	$k_с$	$k_Д$	$k_В$
Менее 1	1,4-1,15	0,65-0,85	0,2-0,08
1—10	1,2-1,1	0,82-0,95	0,1-0,025
10—100	1,15-1,06	0,85-0,97	0,035-0,02
100—1000	1,06-1,03	0,93-0,98	0,02-005

Для электрических машин общего назначения можно определить электромагнитную мощность по формуле

$$P' = P_{ном}\frac{1+\eta_{ном}}{2\eta_{ном}}, \qquad (11.2.\ а)$$

где $\eta_{ном}$ — КПД (рис. 11.7).

Выбор коэффициента полюсного перекрытия. Расчетный коэффициент полюсного перекрытия α_δ, как следует из (1.1), оказывает влияние на степень использования машины: с увеличением α_δ возрастает использование машины. Однако при чрезмерном увеличении α_δ уменьшается ширина межполюсного окна $(\tau - b_p)$, возрастает поток рассеяния главных полюсов, увеличивается проникновение поля главных полюсов в зону коммутации, уменьшается коммутационная надежность машины.

Для машин общего назначения с добавочными полюсами значение α_δ устанавливается в пределах 0,55...0,72, без добавочных полю сов α_δ = 0,6...0,85.

На рис. 11.8 приведены зоны предельных значений α_δ для машин общего назначения при числе полюсов $2p \geq 4$.

Выбор электромагнитных нагрузок. Согласно (1.1) увеличение электромагнитных нагрузок A и B_δ приводит к улучшению использования объема якоря.

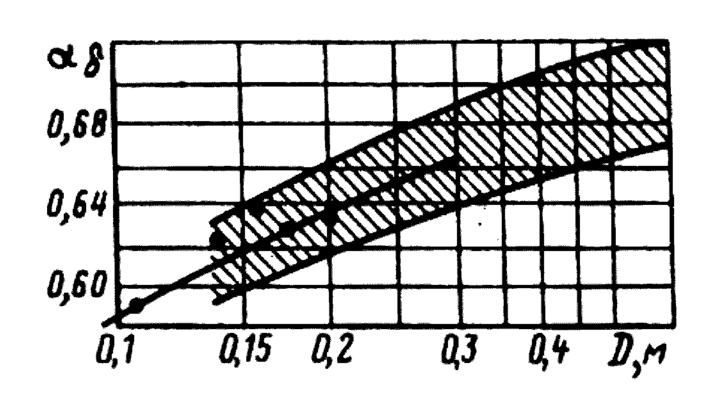


Рис. 11.8. Зависимость $\alpha_\delta = f(D)$

Однако с ростом линейной нагрузки A увеличивается нагрев якоря и машины, ухудшается коммутация, с ростом B_δ насыщаются отдельные участки магнитной цепи.

Таким образом, оптимальные значения электромагнитных нагрузок невозможно выбрать на начальном этапе расчета электрической машины. Этот выбор, как правило, основывает-

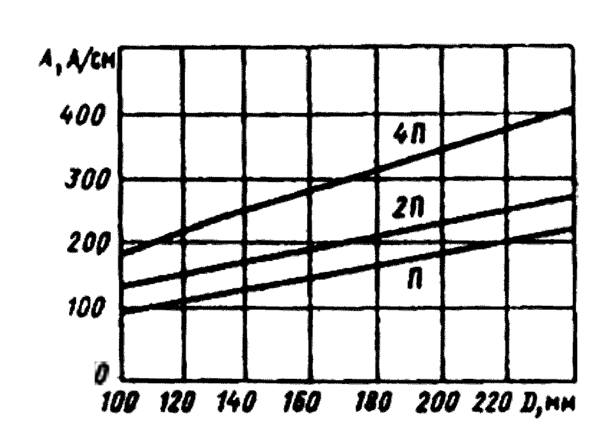


Рис. 11.9. Зависимость линейной нагрузки от диаметра якоря

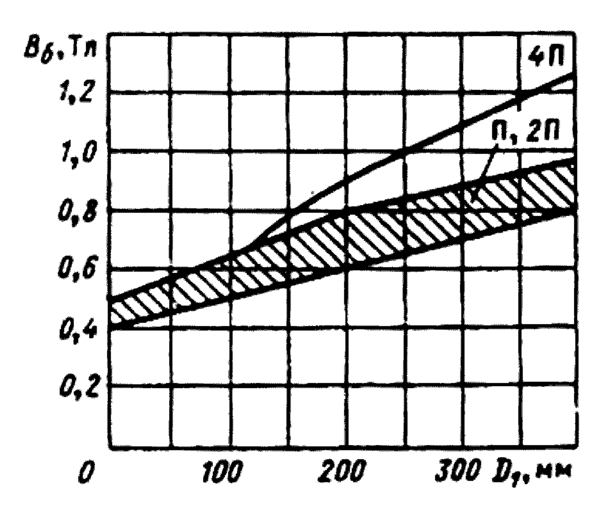


Рис. 11.10. Зависимость индукции в воздушном зазоре от диаметра якоря

ся на данных, полученных в результате анализа ранее разработанных серий машин постоянного тока или путем расчета и сравнения ряда вариантов.

Рекомендуемые значения A и B_δ для машин общего назначения приведены на рис. 11.9 и 11.10. При выборе линейных нагрузок необходимо учитывать, что для хорошо охлаждаемых машин можно выбрать более высокие значения линейных нагрузок; для тихоходных машин, работающих, с перегрузками и частными реверсами, необходимо принимать уменьшенные значения линейных нагрузок. Выбранные значения электромагнитных нагрузок обычно корректируются после расчета ряда вариантов выбора главных размеров, геометрии зубцовой зоны и обмоток.

11.4. РАСЧЕТ ОБМОТКИ И ПАЗОВ ЯКОРЯ

В § 3.13 даны исходные рекомендации по выбору и расчету обмоток машин постоянного тока. Тип обмотки и число параллельных ветвей определяют, исходя из принятого числа главных полюсов $2p$ и тока параллельной ветви I_a. Число главных полюсов машин постоянного тока общего назначения в зависимости от диаметра можно принимать: $2p = 2$ при D до 100 мм и $2p = 4$ при $D = 112...500$ мм.

Для расчета числа параллельных ветвей определяют предварительное значение тока якоря, А:

$$\text{для генераторов} \quad I = \frac{P_{ном}}{U}(1 + k_B);$$

$$\text{для двигателей} \quad I = \frac{P_{ном}}{U}(1 - k_B). \qquad (11.3)$$

Значения коэффициентов k_B, приведены в табл. 11.8.

Исходя из принятого числа главных полюсов $2p$, предварительного значения тока якоря I и допустимого тока параллельной ветви $I_a = 250...300$ А согласно данным § 3.14 принимают тип обмотки.

При токах якоря до 600 А выбирают простую волновую обмотку, от 500 до 1400 А — простую петлевую обмотку.

Число проводников обмотки якоря

$$N - (A\pi D2a)/I. \qquad (11.4)$$

Согласно рекомендации § 3.14 и ориентировочным значениям зубцового деления t_{Z1} определяют число пазов якоря:

$$Z \quad \pi D / t_{Z1} \qquad (11.5)$$

Ориентировочные значения t_{Z1} для различных высот оси вращения следующие:

h, мм	80	200	225	315	355	500
t_{Z1}, мм	10	20	15	35	18	40

Число эффективных проводников обмотки в пазу N/Z должно быть в двухслойных обмотках четным числом.

По условиям коммутации пазовый ток $I_п = At_{Z1}$ не должен превышать 1500... 1600 А при $D < 1000$ мм.

Для расчета числа коллекторных пластин K и числа секционных сторон в пазу $u_п$ целесообразно рассмотреть несколько вариантов выполнения обмотки. Результаты расчета удобно представить в виде таблицы

№ варианта	$u_п$	$K = u_п Z$	$w_C = \dfrac{N}{2K}$	$U_{к.ср} = \dfrac{2pU_{ном}}{K}$
1				
2				
.				
.				
.				
n				

При сравнении вариантов следует учесть, что в двигателях с полузакрытыми пазами всыпная обмотка из круглых проводников может иметь дробное число витков секции $w_C = \dfrac{N}{2K}$, так как в этом случае допускается выполнение секций, расположенных в одном пазу с разным числом витков. Например, в некоторых машинах серии 2П при волновой обмотке с $u_п = 3$ число витков в секциях принято равным 1-2-1, 2-1-2, 5-4-5.

При открытых пазах и проводах прямоугольного сечения значения w_C должны округляться до ближайшего целого числа.

Максимальное число коллекторных пластин $K = u_п Z$ должно оцениваться по минимально допустимому значению коллекторного деления, которое в зависимости от диаметра коллектора должно быть не менее:

$D_к$, мм	125	140-280	315-500
$t_к$, мм	3	3,5	3,8

Для серийных машин без компенсационной обмотки допускается $U_{к\,ср}$ до 16 В, для машин с компенсационной обмоткой $U_{к.ср} \leq 20$ В, для машин малой мощности (до 1 кВт) $U_{к\,ср} \leq$ 25...30 В. Для расчета коллекторного деления $t_к$ необходимо выбрать внешний диаметр коллектора $D_к$, из следующего ряда по ГОСТ 19780—81: 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 125, 140, 160, 180 200 224, 250, 280, 315, 355, 400, 450 мм.

Диаметр коллектора $D_к$ при открытых пазах якоря должен находиться в пределах

$$D_к = (0{,}65...0{,}7)D. \tag{11.6}$$

При полузакрытых пазах якоря и отсутствии петушков на коллекторе

$$D_к = (0{,}65...0{,}8)D \tag{11.7}$$

После выбора варианта обмотки необходимо уточнить линейную нагрузку

$$A = \frac{2u_n Z w_C I_a}{\pi D} \tag{11.8}$$

и скорректировать расчетную длину машины.

Поперечное сечение эффективного проводника обмотки якоря, м^2,

$$q_a = \frac{I}{2aJ_a} \tag{11.9}$$

где J_a, — плотность тока, А/м^2.

Плотность тока предварительно выбирают, используя зависимости произведения AJ от класса нагревостойкости изоляции (рис. 11.11), построенные по данным серийных машин постоянного тока.

Для всыпных обмоток якоря с полузакрытыми пазами следует выбрать круглый провод марки ПЭТВ при классе нагревостойкости В. При классе нагревостойкости Н могут быть применены провода марки ПСДТК. Диаметр изолированного провода не должен превышать 1,8 мм.

Эффективные проводники всыпных обмоток обычно состоят из нескольких элементарных проводников. Число элементарных проводников $n_{эл}$ и сечение элементарного проводника $q_{эл}$ определяют из равенства

$$q_a = n_{эл} q_{эл}. \tag{11.10}$$

где $n_{эл}$ должно быть целым числом.

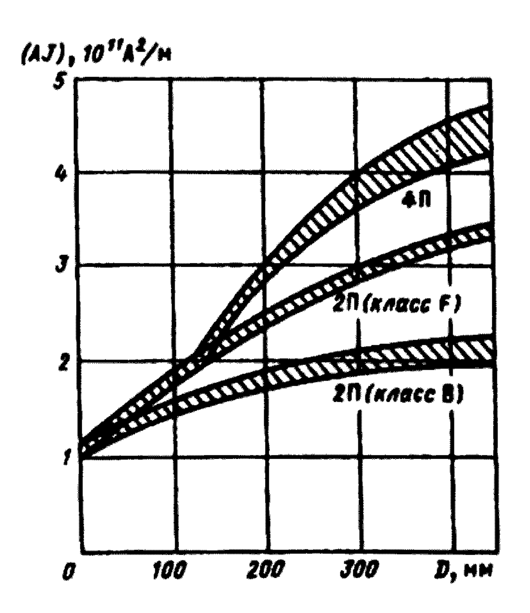


Рис. 11.11. Зависимость произведения AJ от диаметра якоря

Сечение и размеры прямоугольных проводников обмотки якоря с открытыми пазами определяют при расчете размеров паза и зубца.

Форма паза и геометрии зубцовой зоны в целом зависят от диаметра якоря, типа и конструкции обмотки.

Наиболее целесообразной, с точки зрения технологии обмоточных работ, формой паза является открытый паз с параллельными стенками. При прямоугольной форме проводников эти пазы имеют высокий коэффициент заполнения.

Однако при открытых пазах увеличивается коэффициент воздушного зазора, возрастают пульсация магнитного потока и зубцовые гармонические электромагнитного момента. Увеличиваются также поверхностные и пульсационные добавочные потери в магнитной системе.

Области применения полузакрытых и открытых пазов указаны в гл. 3.

При диаметрах якоря до 50 мм для упрощения формы штампа допускается применение пазов круглой формы.

При выбранной форме паза исходной величиной в расчетах геометрии зубцовой зоны является площадь паза, которая должна быть достаточной только для размещения в пазу проводников обмотки якоря, изоляции и крепления (клина).

Овальные пазы якоря. При овальной форме паза зубцы выполняют с равновеликим по высоте сечением (рис. 11.12). Ширина зубца предварительно

$$b_Z = B_\delta t_{Z1} / (k_C B_Z), \qquad (11.11)$$

где B_Z — допустимое значение индукции в зубцах, Тл; k_c — коэффициент заполнения пакета якоря сталью (см. табл. 9.13).

Значения магнитной индукции B_Z в зависимости от частоты перемагничивания, степени защиты и способа охлаждения могут быть приняты согласно данным табл. 11.9.

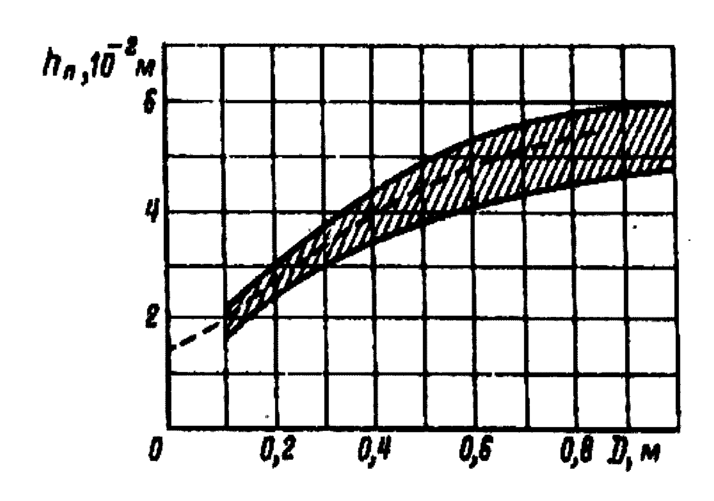


Рис. 11.12. Зависимость высоты паза от диаметра якоря

Высоту паза $h_п$ предварительно выбирают согласно рис. 11.13. Предварительно выбранные значения размеров паза уточняют на основании расчетов индукций в соответствующих участках магнитной цепи зубцовой зоны и размещении обмоток в пазах. Одновременно необходимо иметь в виду, что высота ярма якоря h_j (см. рис. 11.13) должна быть более или равной значению $h_{j\min}$, при котором магнитная индукция в спинке якоря

является предельно допустимой (табл. 11.10).

Таблица 11.9. **Значения магнитной индукции в зависимости от частоты перемагничивания**

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция Bz, Тл, при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	25 и ниже
IP22, IC01, IC17, IP44, IC37	1,65-1,85	1,75-1,95	1,85-2,05	1,9-2,1
IP44, IC0141	1,4-1,6	1,5-1,7	1,55-1,75	1,6-1,8
IP44, IC004I	1,3-1,5	1,3-1,6	1,5-1,7	1,55-1,75

Таблица 11.10. **Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения**

Исполнение двигателей по степени защиты и способу охлаждения	Магнитная индукция Bj, Тл, при частоте перемагничивания, Гц	
	50-100	до 50
IP22, IC01, IP22, IC17, IP44, IC37	1,4	1,45
IP44, IC0141	1,15	1,2
IP43, IC0041	1,05	1,1

Примечание. При числе полюсов $2p$ 2 предельные значения B_j можно увеличить на 0,2 Тл.

Минимальная высота спинки якоря $h_{j\min}$ равна

$$h_{j\min} = \frac{\Phi}{2lkB_j} + \frac{2}{3}d_к, \qquad (11.12)$$

где Ф — магнитный поток в воздушном зазоре, Вб; l — длина пакета якоря, м; d_f — диаметр аксиальных вентиляционных каналов, м, Bj — индукция в спинке якоря.

Обычно магнитопроводы якорей с овальными пазами выполняются без аксиальных каналов, и только в некоторых случаях при высотах оси вращения $h \geq 200$ мм и диаметрах якоря свыше 200 мм выполняется один ряд аксиальных каналов.

При расчете h_n и h_j необходимо вдаться значением внутреннего диаметра листов якоря D_0 (см. рис. 11.13). Это значение приближенно определяют по формуле:

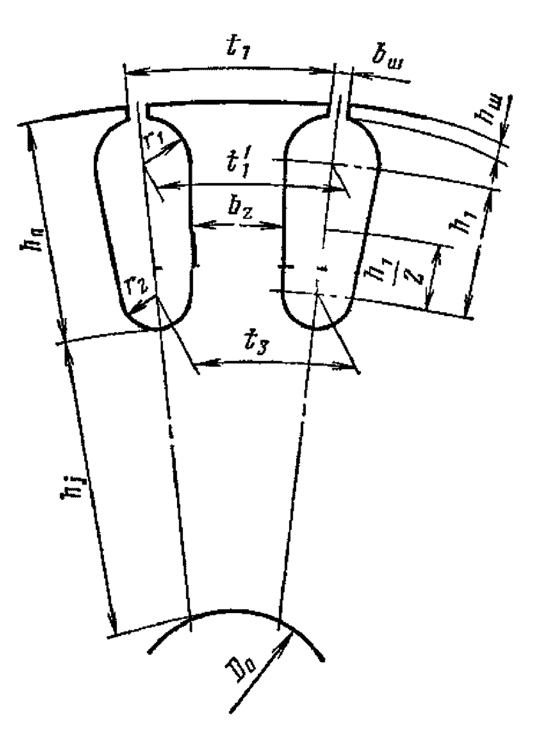


Рис. 11.13. Размеры полузакрытых пазов овальной формы

$$D_0 \approx 27\sqrt[3]{P_{ном} / n_{ном}}\,, \qquad (11.13)$$

где D_0 — в см, если $P_{ном}$ в кВт.

Для машин серии 2П внутренний диаметр D_0 можно определить по табл. 11.11.

Таблица 11.11. **Внутренний диаметр машин серии 2П**

h, мм	90	110	112	132	160	ISO	200
D, мм	90	106	110	132	156	180	200
D_0, мм	24	28	38	50	55	60	65

При выбранной ширине зубца bz и установленном значении $h_п$ определяют размеры и площадь сечения паза (см. рис. 11.13):

высота шлица $h_ш \approx$ 0,5...0,8 мм;

ширина шлица принимается больше суммы максимального диаметра изолированного проводника и двусторонней толщины изоляции:

больший радиус

$$r_1 = \frac{\pi(D - 2h_ш) - Zb_Z}{2(Z + \pi)}; \qquad (11.14)$$

меньший радиус

$$r_2 = \frac{\pi(D - 2h_п) - Zb_Z}{2(Z - \pi)}; \qquad (11.15)$$

расстояние h_1

$$h_1 = h_п - h_ш - r_1 - r_2; \qquad (11.16)$$

площадь паза в штампе

$$S_п = \frac{\pi}{2}(r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2)h_1; \qquad (11.17)$$

площадь сечения пазовой изоляции

$$S_{из} = b_{из}(2\pi r_1 + \pi r_2 + 2h_1); \qquad (11.18)$$

площадь пазового клина и изоляционной прокладки между слоями обмотки

$$S_к = (3...5)r_1; \qquad (11.19)$$

площадь поперечного сечения паза, заполненная обмоткой,

$$S_{п.о.} = S_п - S_{из} - S_к; \qquad (11.20)$$

площадь поперечного сечения обмотки, уложенной в один паз,

$$S_0 = \frac{2d_{из}^2 n_{эл} u_п w_C}{k_з}, \qquad (11.21)$$

где $d_{из}$ — диаметр одного изолированного провода; $n_{эл}$— число элементарных проводников в одном эффективном проводнике; w_C — число витков в секции; $u_п$ — число секционных сторон в пазу; $k_з$ — коэффициент заполнения паза изолированными проводниками: $k_з$ 0,68...0,72; $b_{из}$ — толщина пазовой изоляции по (11.18).

Если площадь поперечного сечения паза $S_{по}$ больше площади поперечного сечения обмотки S_0, то необходимо выбрать проводники большего диаметра и снизить плотность тока J_a обмотки якоря.

Если $S_0 > S_{по}$, требуется увеличить плотность тока и выбрать проводники меньшего сечения, чтобы обеспечить коэффициент заполнения паза $k_з$ не более 0,72.

Средняя длина полувитка секций обмотки якоря с овальными пазами и всыпными обмотками, м,

$$l_{a\,ср} = l_л + l_i \,, \qquad (11.22)$$

где $l_л$ — длина лобовой части, м; l_n — длина якоря, м. Средняя длина лобовой части:

при $2p = 2$

$$l_л = 0{,}9\tau \,; \qquad (11.23)$$

при $2p = 4$

$$l_л = (1{,}2...1{,}3)\tau \,. \qquad (11.24)$$

Сопротивление обмотки якоря, Ом,

$$R_a = \rho_\vartheta \frac{N l_{aср}}{(2a)^2 q_a} \,, \qquad (11.25)$$

где ρ_ϑ — удельное сопротивление меди при расчетной рабочей температуре, q_a — по (11.9).

Масса меди, кг,

$$m_{Ma} = 8900 l_{aср} N q_a \,. \qquad (11.26)$$

Прямоугольные пазы якоря. При прямоугольной форме паза (рис. 11.14) предварительно задаются высотой паза h_n (см. рис. 11.13). Ширина зубца в минимальном сечении b_{Z3} (у основания паза) определяется допустимой индукцией $B_{Z\max}$, значения которой можно принять по табл. 11.12.

Таблица 11.12. **Значения допустимой индукции**

Исполнение двигателей по степени защиты и способу и охлаждения	Магнитная индукция $B_{Z\max}$, Тл. при частоте перемагничивания, Гц			
	100	75	50	25 и ниже
IP22, IC01, IC17, IP44, IC37	1,9-2,1	2-2,2	2,1-2,3	2,2-2,4
IP44, IC0141	1,6-1,8	1,7-1,9	1,8-2	1,9-2,1
IP44, IC0041	1,5-1,7	1,6-1,8	1,7-1.9	1,8-2

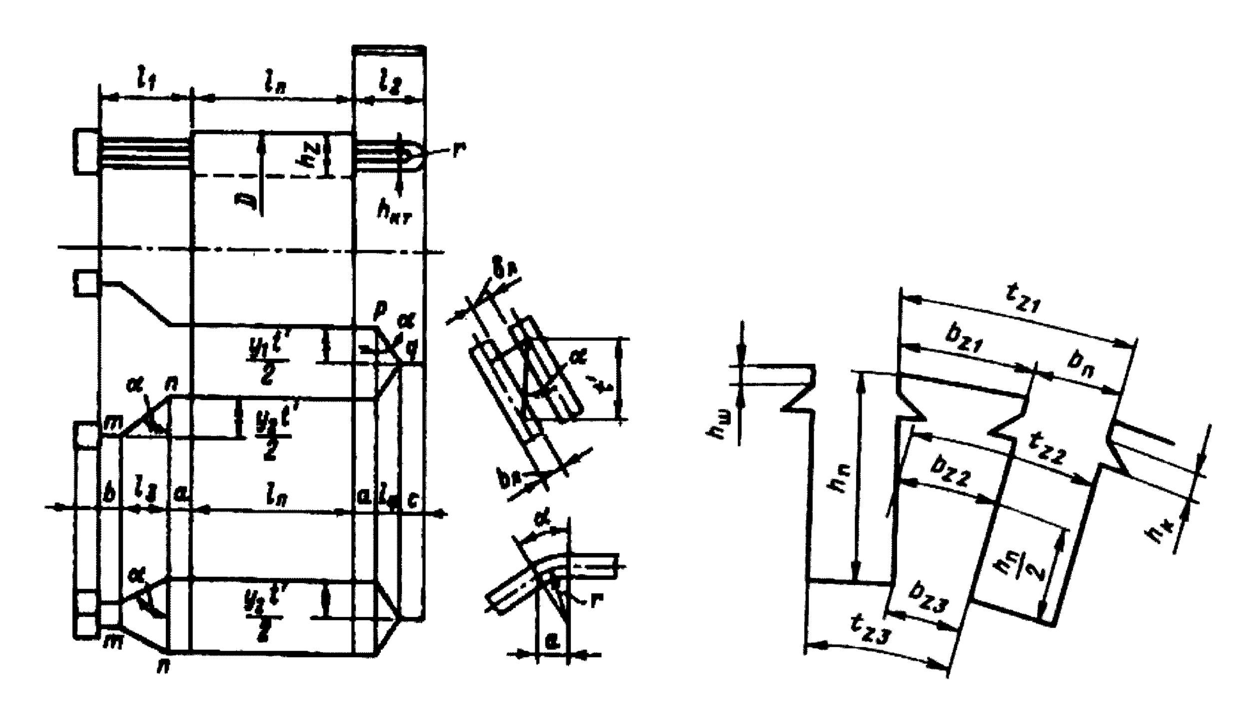


Рис. 11.14. Размеры пазов прямоугольной формы

Рис. 11.15. К расчету и проектированию секций обмоток якоря

Якоря машин постоянного тока общего назначения с прямоугольными пазами при диаметрах свыше 200 мм имеют аксиальные вентиляционные каналы. При диаметрах до 300 мм достаточно выполнить один ряд каналов диаметром от 15 до 22 мм при числе каналов от 18 до 25.

При диаметрах от 300 мм до 500 мм выполняют два ряда каналов диаметром от 24 до 34 мм с числом каналов от 24 до 30.

При диаметрах якоря до 500 мм пакет магнитопровода насаживают непосредственно на вал. Внутренний диаметр сердечника в этом случае принимают ориентировочно равным $D_0 \approx 0{,}3D$ или рассчитывают по формуле (11.13).

Размеры паза $h_п$ и $b_п$ и спинки якоря h_j; уточняют после проверки индукции в спинке якоря B_j, которая не должна превышать предельных значений, приведенных в табл. 11.10.

При креплении обмоток в пазах якоря клиньями (рис. 11.14) высота клина $h_{кл}$ принимается равной приблизительно 4 мм, высота шлица $h_ш$ = 1 мм.

После выбора размеров паза и зубца определяется максимальная ширина проводника с изоляцией:

$$b_{пр} = (b_п - b_{из}) / u_п. \qquad (11.27)$$

При скосах пазов на одно или половину зубцового деления расчетную ширину паза в формуле (11.27) необходимо уменьшить на 0,1 мм.

Предельно допустимые значения высоты проводника с изоляцией равны:

$$a_{пр} = (h_п - h_{из} - h_к)/(2w_C), \qquad (11.28)$$

где w_C— число витков в секции. Для уменьшения эффекта вытеснения тока в проводниках обмотки якоря, вращающегося в магнитном поле, принимается высота элементарного проводника не более 4 мм при $f \geq$ 100 Гц, 7 мм при $f \approx$ 50 Гц, 10 мм при $f \leq$ 25 Гц. В этом случае допускается разделить эффективный проводник по высоте на два элементарных проводника, каждый из которых имеет высоту, не превышающую допустимый размер по высоте для данной частоты.

По размерам $a_{пр} \times b_{пр}$ необходимо выбрать по табл. П3.3 стандартные размеры и сечение проводника.

Обмотки якорей с прямоугольными пазами выполняют из проводников прямоугольного сечения марки ПЭТВП при классе нагревостойкости изоляции В и ПЭТП-155 при классе нагревостойкости изоляции F.

Все типы двигателей серии 4П выполняют с изоляцией класса нагревостойкости F.

Если провода имеют круглое сечение, то при классах нагревостойкости изоляции Вир выбирают марку ПСД, при классе нагревостойкости Н — ПСДК.

После проверки размещения всех проводников обмотки якоря в пазу с учетом клина, пазовой и витковой изоляций уточняют размеры паза, которые округляют до ближайшей большей десятой миллиметра.

По выбранному сечению проводника определяют плотность тока, А/м^2,

$$J_a = I_a / q_a \tag{11.29}$$

и произведение AJ_a, А^2/м^3.

Полученное значение произведения AJ_a необходимо сравнить с рекомендованными (см. рис. 11.11). Если AJ_a, превышает допустимые значения, то необходимо увеличить площадь паза и, повторив расчет зубцовой зоны и размеров проводников, установить окончательные размеры паза.

Размеры секций обмотки якоря (рис. 11.15) определяют по чертежу пакета якоря и обмоточным данным.

Длины переднего l_1 и заднего l_2 вылетов секции равны:

$$l_1 = l_3 + a + b;$$

$$l_2 = l_4 + a + c,$$

где a — прямолинейный участок секции с учетом радиуса изгиба; в зависимости от напряжения значение a равно:

U, В	250	500	750	1500
a, м	0,013	0,015	0,019	0,025

b — прямолинейный участок концов секции, который при перекрученных проводниках секции равен 0,015...0,02 м, при расплющенных концах секции 0,04 м, при выполнении

секции без скрутки проводников 0,012...0,015 м; c — прямолинейные участки лобовых частей передней части секции (с учетом радиуса изгиба):

$$c = 0{,}004 + r + h_{кт}.$$

Прямолинейные участки лобовых частей передней части секции $mn = l_5$ и задней $pq = l_6$ равны:

$$l_5 = y_2 t_Z /(2\cos\alpha); \qquad l_6 = y_1 t_Z /(2\cos\alpha). \tag{11.30}$$

Соответственно вылеты l_3 и l_4 равны:

$$l_3 = y_2 t_Z tg\alpha / 2; \qquad l_4 = y_1 t_Z tg\alpha / 2, \tag{11.31}$$

где

$$y_1 = Z / 2p \pm \varepsilon; \qquad y_2 = y - y_1.$$

Шаг t_Z для предварительных расчетов

$$t_Z = \pi(D - 2h_п) / Z. \tag{11.32}$$

Угол α определяют согласно рис. 11.15:

$$\sin\alpha = (b_л + \delta_л) / t_Z, \tag{11.33}$$

где $b_л$ — толщина катушки в лобовой части; $b_л \approx 1{,}2 b_п$; $\delta_л$ — расстояние между лобовыми частями двух соседних катушек:

$$\delta_л = (0{,}4...10) \cdot 10^{-3}\ м.$$

Длина полувитка обмотки якоря, м,

$$l_{аср} = l_п + 2a + l_5 + l_6 + b + c. \tag{11.34}$$

Сопротивление и массу обмотки определяют соответственно по (11.25), (11.26).

11.5. РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ПОД ГЛАВНЫМИ ПОЛЮСАМИ. КОМПЕНСАЦИОННАЯ ОБМОТКА

Воздушный зазор под главными полюсами является одним из главных размеров машины, хотя выбирают его часто, исходя из технологических и конструктивных соображений. От размера этого зазора зависят основные характеристики машины, а также потенциальные условия коммутации на коллекторе, допустимый диапазон регулирования частоты вращения и т. д.

Поскольку в машинах постоянного тока, за редким исключением, щетки устанавливаются строго по линии геометрической нейтрали, а магнитная цепь насыщена, то при расчете магнитной цепи машины рассматривают только поперечную составляющую реакции якоря и влияние ее на магнитное поле в воздушном зазоре.

Расчет размагничивающего действия поперечной реакции якоря производят по переходной характеристике $B_\delta = \varphi(F_\delta + F_Z + F_j)$ (рис. 11.16), построенной по результатам расчета магнитной цепи (см. табл. 11.19). При нагрузке под действием поперечной реакции якоря магнитное поле в воздушном зазоре искажается: под одним краем полюса индукция уменьшается, под другим возрастает. Точки d и f, отстоящие от ординаты ab на расстоянии 0,5 Ab_p (где b_p — ширина полюсной дуги), определяют значения $B_{\delta\min}$ и $B_{\delta\max}$ под краями полюсов, а кривая daf— распределение индукции в воздушном зазоре на протяжении полюсной дуги.

Среднее значение индукции в воздушном зазоре в этом случае можно определить по формуле, известной из общего курса теории электрических машин [6]:

$$B_{\delta cp} \approx (B_{\delta\min} + 4B_\delta + B_{\delta\max})/6, \tag{11.35}$$

где B_δ — индукция в воздушном зазоре в режиме холостого хода.

Для определения МДС размагничивания поперечной реакции якоря F_{qd} необходимо ось ab криволинейного четырехугольника $edafh$ сместить по оси $F_{\delta Zj}$ на отрезок bb'. В масштабе МДС этот отрезок определяет размагничивающее действие реакции якоря.

Как видно из рис. 11.16, поперечная реакция якоря нарастает от середины полюсной дуги к его краям. При значительной поперечной реакции якоря может произойти опрокидывание поля под одним краем полюса: точка d сместится по кривой индукции (рис. 11.16) в область отрицательных значений B_δ.

Так как поле реакции якоря замыкается по контуру — зубцы якоря, спинка якоря, воздушный зазор, полюсный наконечник, то воздушный зазор выбирают таким, чтобы индукция B_δ на протяжении всей полюсной дуги не изменяла своего направления. Обычно

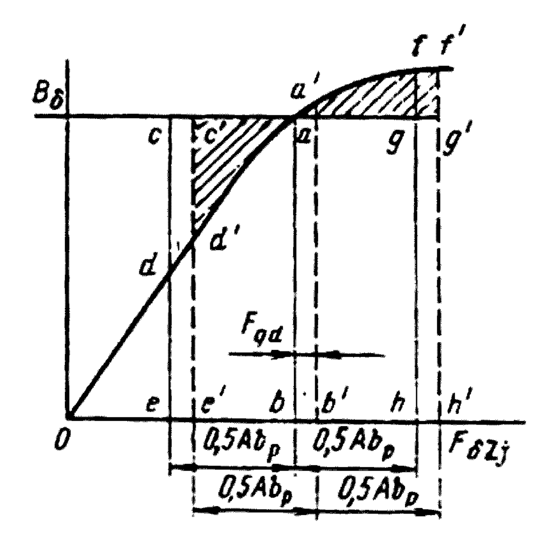


Рис. 11.16. Переходная характеристика машины постоянного тока

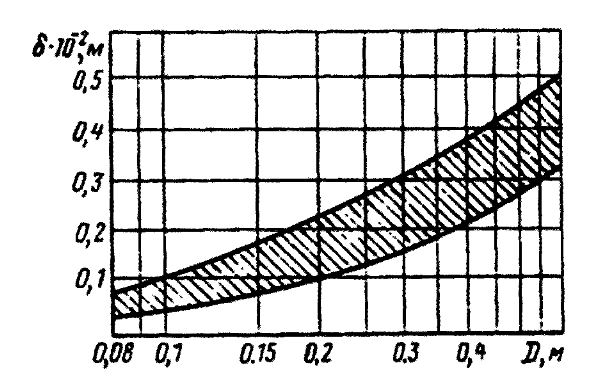


Рис. 11.17. Зависимость длины воздушного зазора от диаметра якоря

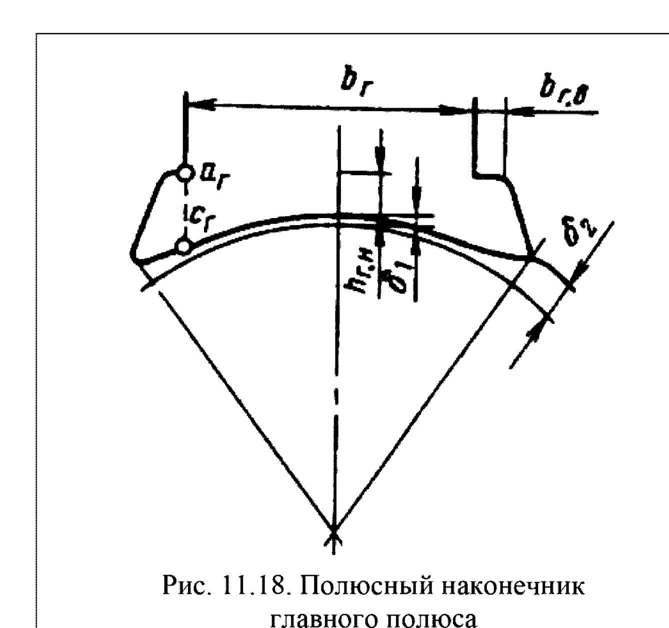


Рис. 11.18. Полюсный наконечник главного полюса

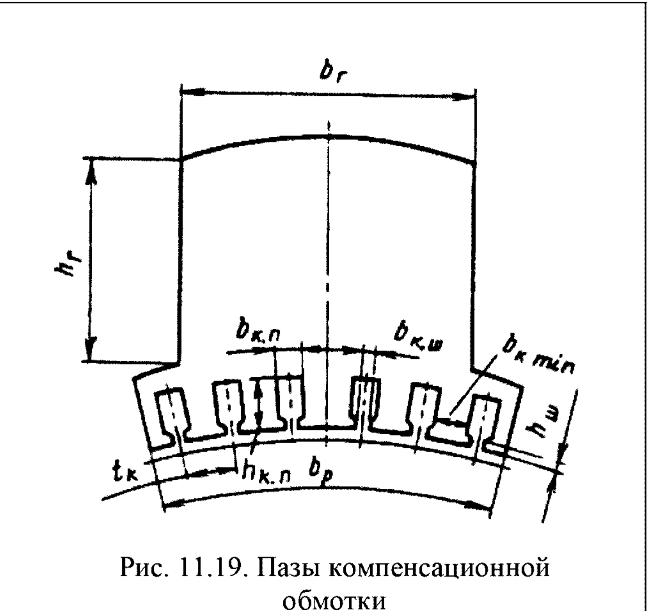


Рис. 11.19. Пазы компенсационной обмотки

это условие выполняется на всех рабочих диапазонах изменения тока якоря и индукции в воздушном зазоре, если воздушный зазор δ находится в пределах, указанных на рис. 11.17.

В целях снижения реакции якоря под краями полюсов воздушный зазор может выполняться эксцентричным или с приподнятыми краями полюсов (рис. 11.18). В этом случае воздушный зазор может быть рассчитан по формуле

$$\delta_{расч} = k\delta_1, \qquad (11.36)$$

где $k = \sqrt{\delta_2/\delta_1 - 1} / arctg\sqrt{\delta_2/\delta_1 - 1}$ — коэффициент приведения неравномерного воздушного зазора, имеющего размер δ_1 под серединой полюса и δ_2 под краем полюсного наконечника. Обычно $\delta_2 \approx (1{,}5...1{,}6)\delta_1$.

В машинах серии 4П и в машинах других серий при диаметрах якоря свыше 300 мм, а также в машинах с широким диапазоном регулирования частоты вращения и большой кратностью перегрузок для компенсации поперечной реакции якоря в зоне полюсной дуги применяют компенсационную обмотку.

Конструктивно компенсационную обмотку выполняют в виде однослойной катушечной, а в крупных машинах — в виде стержневой обмотки и укладывают в пазы наконечников главных полюсов (рис. 11.19) или в пазы статора в машинах серии 4П.

Схема выполнения компенсационной обмотки приведена на рис. 11.20, где буквами N и S обозначена полярность добавочных полюсов.

При расчете компенсационной обмотки обычно принимают ее МДС в зоне полюсной дуги в пределах

$$0{,}85A\frac{b_p}{2} < F_к < 1{,}15A\frac{b_p}{2}. \qquad (11.37)$$

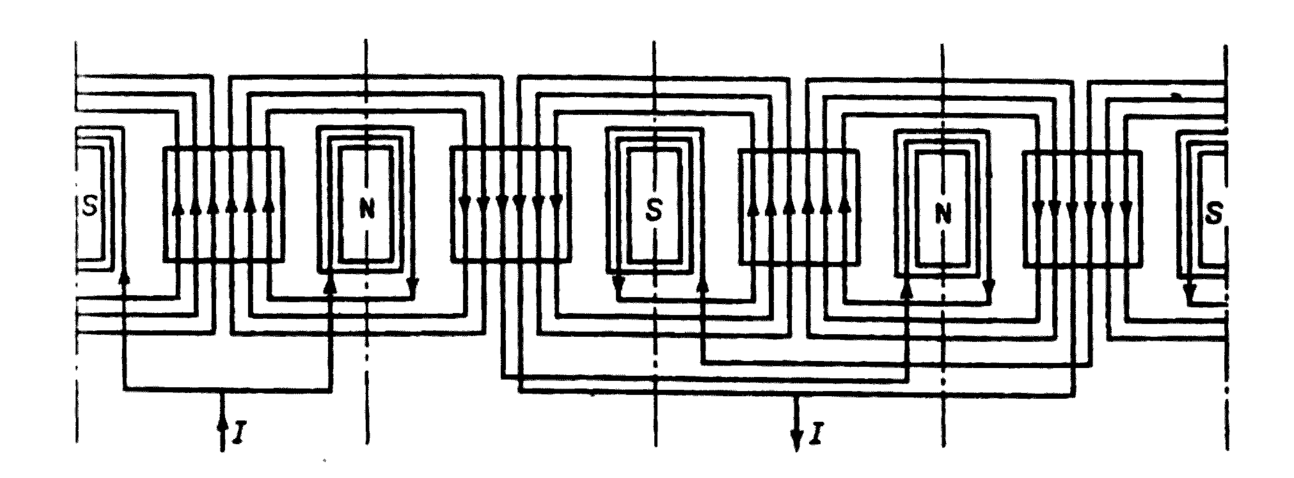


Рис. 11.20. Схема выполнения компенсационной обмотки

Компенсационную обмотку соединяют последовательно с обмоткой якоря, что создает автоматическую компенсацию реакции якоря при любом токе нагрузки.

Во избежание вибраций магнитного происхождения зубцовый шаг по полюсному наконечнику $t_к$ (см. рис. 11.19) должен отличаться от зубцового шага t_{Z1} по якорю. Это условие обычно выполняется, если число пазов компенсационной обмотки находится в пределах

$$Z_к \neq (0{,}85...1{,}15)\frac{Z}{2p}a_\delta . \qquad (11.38)$$

Число зубцов $Z_к$ должно быть четным. Выбор числа зубцов $Z_к$ и расчет зубцовой зоны компенсационной обмотки производят в следующем порядке.

Определяют число проводников компенсационной обмотки на один полюс:

$$N_к = Ab_p a_к / I, \qquad (11.39)$$

где $a_к$ — число параллельных ветвей компенсационной обмотки; / — ток якоря, А.

Число параллельных ветвей $a_к$ принимают равным единице при токе якоря до 2000 А. Если ток в пазу компенсационной обмотки превышает 2000 А, то ее выполняют в две параллельные ветви: $a_к = 2$.

Выбирая Zк в диапазоне от 6 до 12, определяют шаг $t_к$, ширину зубца $b_{Zк} = t_к B_\delta \sigma_г / B_{Zк} k_c$ где $\sigma_г = 1{,}05$ — коэффициент рассеяния главного полюса; $B_{Zк} = 1{,}6...1{,}8$ Тл — индукция в минимальном сечении зубца компенсационной обмотки.

Ширина паза в свету равна:

$$b_п = t_к - b_{Zк\min} . \qquad (11.40)$$

При выбранном числе пазов $Z_к$ определяют число проводников обмотки в одном пазу:

$$n_к = N_к / Z_к . \qquad (11.41)$$

Число $n_к$ округляют до ближайшего целого числа.

Площадь поперечного сечения проводника компенсационной обмотки

$$q_к = I/(a_к J_к), \qquad (11.42)$$

где $J_к$ — плотность тока в компенсационной обмотке.

В зависимости от класса нагревостойкости изоляции плотность тока $J_к$ принимают равной $(4{,}7...5{,}2)\cdot 10^6$ А/м^2 для класса B, $(5{,}3...5{,}8)\cdot 10^6$ А/м^2 для класса F и $(6{,}0...6{,}6)\cdot 10^6$ А/м^2 для класса H. Плотность тока в компенсационных обмотках машин серии 4П принимают в соответствии с рекомендациями по выбору плотности тока в статорных обмотках асинхронных машин серии 4А.

При числе проводников в пазу более двух компенсационную обмотку выполняют катушечной с укладкой в открытые пазы. В этом случае проводники размещают в зависимости от выбранных размеров элементарного проводника либо меньшей, либо большей стороной по ширине паза. Стороны катушечных групп могут укладываться как в один, так и в два ряда по ширине паза (рис. 11.21, *а* *в*). При числе проводников в пазу $n_к$ = 1 или 2 (рис. 11.21, *г, д*) обмотку выполняют стержневой. Стержневые обмотки из неизолированной шинной меди изолируют и вставляют с торца в полузакрытые пазы, ширину шлица паза принимают равной 2—3 мм. В лобовых частях стержни соединяют дугами из неизолированной шинной меди.

Конструкция изоляции компенсационных обмоток в пазу и лобовых частях приведена в табл. 11.13—11.15.

После выбора стандартных размеров проводника, схемы размещения проводников в пазу и класса нагревостойкости изоляции обмотки окончательно рассчитывают размеры пазов, уточняют степень компенсации:

$$k_к = N_к I/(a_к b_p A). \qquad (11.43)$$

Коэффициент $k_к$, должен находиться в пределах 0,85 — 1,15.

Высота клина принимается равной $h_к$ 2,5 мм, высота шлица $h_ш$ 1,0 мм.

Средняя ширина катушки компенсационной обмотки, м,

$$b_{к\ кат\ ср} = \frac{\pi(D_c + h_к)}{2p} - \frac{b_p}{2}\frac{(D_c + h_к)}{D_c}, \qquad (11.44)$$

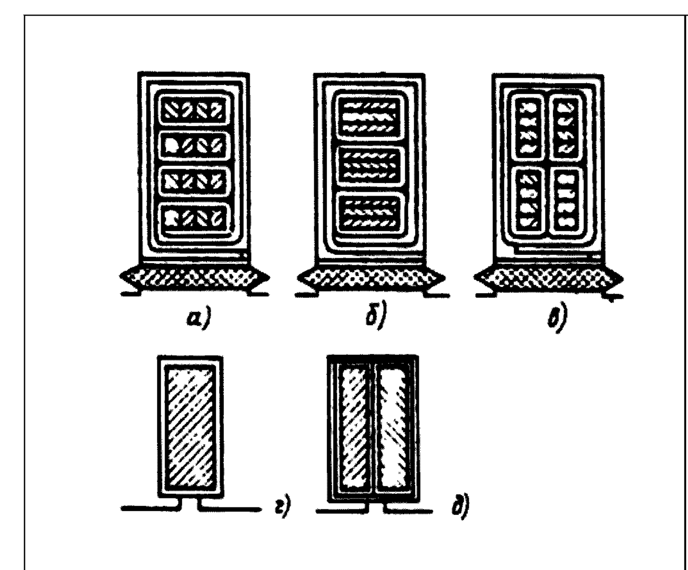


Рис. 11.21. Укладка проводников в пазы компенсационной обмотки

Таблица 11.13. **Изоляция компенсационной обмотки машин постоянного тока (пазы прямоугольные полузакрытые, обмотка однослойная стержневая, *h* =355...500 мм, напряжение до 1000 В)**

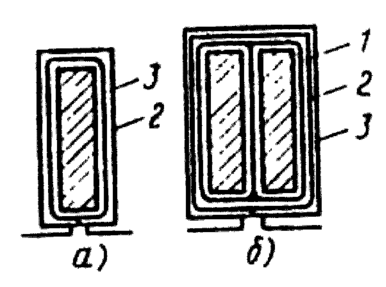


Таблица 11.14. **Изоляция компенсационной обмотки двигателей постоянного тока (пазы прямоугольные открытые, обмотка однослойная секционная из неизолированных проводов, *h*=355...500 мм, напряжение до 1000 В, изоляция класса нагревостойкости В)**

Позиция	Материал						Число слоев			Двусторонняя толщина изоляции			
	Наименование, марка			Толщина, мм						Рисунок *а*		Рисунок *б*	
	Класс нагревостойкости			Класс нагревостойкости			Класс нагревостойкости			по ширине	по высоте	по ширине	по высоте
	B	F	H	B	F	H	B	F	H				
1	Стеклослюдинитовая лента ЛС-ПЭ-994-ТП		Полиимидная пленка ПМ	0,1	0,1	0,05	1 вполнахлеста		2 вполнахлеста	—	—	0,8	0,8
2	Слюдопластофолий ИФГ-Б	Синтофолий F	Синтофолий Н	0,15	0,16	0,16	4,5 оборота	3,5 оборота	3,5 оборота	1,1	1,1	1,1	1,1
3	Лакотканеслюдопласт ГИТ-ЛСБ-ЛСЛ	Фенилоновая бумага		0,15	0,15	0,15	1	1	1	0,3	0,3	0,3	0,3
	Допуск на укладку обмотки									0,2	0,4	0,3	0,4
	Общая толщина изоляции в пазу									1,6	1,8	2,5	2,6

Таблица 11.14. **Изоляция компенсационной обмотки двигателей постоянного тока (пазы прямоугольные открытые, обмотка однослойная секционная из неизолированных проводов, h=355...500 мм, напряжение до 1000 В, изоляция класса нагревостойкости В)**

Часть обмотки	Позиция на рис.	Материал		Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Наименование, марка	Толщина, мм		по ширине при $u_{п.шир}$		по высоте $u_{п\ выс}$		
					1	2	2	3	4
Пазовая	*1*	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	1,12	1,12	1,68	2,24
	2	Тоже	0,14	То же	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	3	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	4	Стеклолакоткань	0,15	1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	5	Стеклотекстолит	0,5	1	—	—	0,5	0,5	0,5
	—	Разбухание от пропитки	—	—	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Допуск на укладку обмотки	—	—	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
		Общая толщина изоляции в пазу (без высоты клина)			2,22	2,78	3,68	4,24	4,8
Лобовая	*6*	Стеклослюдопластовая лента ЛИ-СК-ТТ	0,14	1 вполнахлеста	0,56	1,12	1,12	1,68	2,24
	7	Тоже	0,14	Тоже	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56
	8	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 впритык	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Общая толщина изоляции секции в лобовой части			1,32	1,88	1,88	2,44	3

Таблица 11.15. **Изоляция компенсационной обмотка машин постоянного тока (пазы прямоугольные открытые, обмотка однослойная секционная из неизолированных проводов, А = 355...500 мм, напряжение до 1000 В)**

Часть обмотки	Позиция на рис.	Материал		Число слоев	Двусторонняя толщина изоляции, мм				
		Наименование, марка	Толщина, мм		по ширине при $u_{п\ шир}$		по высоте при $u_{п\ выс}$		
		Класс нагревостойкости: F / H			1	2	2	3	4
Пазовая	*1*	Фенилоновая бумага	0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
	2	Полиимидная пленка ПМ	0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	3	Фенилоновая бумага	0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	4	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	1 вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	5	Фенилоновая бумага	0,2	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	6	Стеклотекстолит	0,5	1	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
		СТЭФ / СТК			—	—	0,5	0,5	0,5
		Допуск на укладку обмотки	—	—	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5
	—	Общая изоляция в пазу (без высоты клина)	—	—	2,5	2,9	3,6	4,0	4,4
Лобовая	*7*	Фенилоновая бумага	0,05	2 вполнахлеста	0,4	0,8	0,8	1,2	1,6
	8	Полиимидная пленка ПМ	0,05	3 вполнахлеста	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	9	Фенилоновая бумага	0,05	вполнахлеста	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	10	Стеклянная лента ЛЭС	0,1	Тоже	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Общая толщина изоляции секции в лобовой части	—	—	1,8	2,2	2,2	2,6	

где $D_г$ — диаметр внутренней поверхности главного полюса; $h_к$ — высота паза компенсационной обмотки; b_p — ширина полюсного наконечника.

Средняя длина лобовой части компенсационной обмотки, м,

$$l_{к.л} = 1{,}2 b_{к\,кат.ср}. \qquad (11.45)$$

Средняя длина прямолинейной части катушки компенсационной обмотки, м,

$$l_{к\,п} = l_п + 2b_{к.л}, \qquad (11.46)$$

где $b_{к.л}$ — средняя длина прямолинейного участка компенсационной обмотки от торца полюсного наконечника до радиуса закругления: $b_{к.л}$ = 0,05 м при стержневой обмотке и $b_{к.л}$ = 0,03 м при катушечной обмотке.

Средняя длина полувитка обмотки, м,

$$l_{к\,ср} = l_{к.л} + l_{к\,п}. \qquad (11.47)$$

Сопротивление компенсационной обмотки, Ом,

$$R_к = \rho_\vartheta = \frac{N_к l_{к.ср} 2p}{a_к^2 q_к}. \qquad (11.48)$$

Масса меди компенсационной обмотки, кг,

$$m_к = 8900 l_{к.ср} N_к 2p q_к. \qquad (11.49)$$

11.6. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Магнитная система машины постоянного тока представляет собой $2p$ симметричных магнитных цепей (рис. 11.22), каждая из которых состоит из семи последовательно соединенных условно однородных участков: воздушного зазора под главными полюсами, зубцов якоря, ярма якоря, зубцов полюсных наконечников главных полюсов (у компенсированных машин), сердечника главного полюса, зазора между главным полюсом и станиной.

Замкнутый контур магнитных линий пары полюсов является симметричным относительно оси геометрической нейтрали (рис. 11.22), поэтому расчет магнитной цепи машины постоянного тока достаточно производить на один полюс.

Для расчета магнитной цепи необходимо знать размеры всех участков магнитопровода, площади их сечения, магнитные потоки этих участков. Эти данные для машин постоянного тока приведены в табл. 11.16. Коэффициенты, приведенные в этой таблице, рассчитывают следующим образом.

1. Коэффициент воздушного зазора k_δ, учитывающий влияние зубчатости якоря $k_{\delta a}$, зубцов компенсационной обмотки на главном

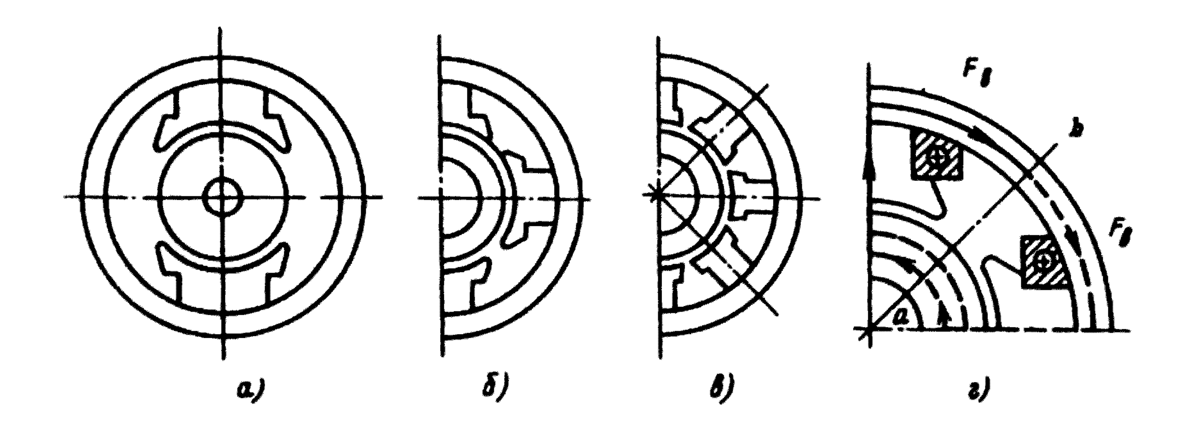


Рис. 11.22. Магнитные системы ($а$ – $в$) и магнитная цепь ($г$) машин постоянного тока

полюсе $k_{\delta к}$, бандажных канавок $k_{б.к}$ и радиальных вентиляционных каналов $k_{в.к}$ на магнитное сопротивление воздушного зазора, равен:

$$k_{\delta} = k_{\delta a} k_{\delta к} k_{б.к} k_{в.к}, \qquad (11.50\ а)$$

где

$$k_{\delta a} = 1 + \frac{b_ш}{t_{Z1} - b_ш + \dfrac{5\delta t_{Z1}}{b_ш}},$$

$$k_{\delta a} = \frac{t_{Z1} + 10\delta}{t_{Z1} - b_ш + 10\delta}; \qquad (11.50\ б)$$

$b_ш$ и t_{Z1} — по рис. 11.13; при прямоугольных пазах (см. рис. 11.14) вместо $b_ш$ вводится $b_п$;

$$k_{\delta к} = 1 + \frac{b_{к.ш}}{t_к - b_{к.ш} + \dfrac{5\delta t_к}{b_{к.ш}}}, \qquad (11.50\ в)$$

$b_{к.ш}, t_к$ — по рис. 11.18.

При бандажах из немагнитного материала

$$k_{\delta к} = 1 + \frac{b_б h_б}{l_a(\delta + h_б) - b_б h_б}, \qquad (11.50\ г)$$

где $b_б$ — общая ширина бандажных канавок на якоре; $h_б$ — глубина бандажных канавок; l_a — длина якоря.

При бандажах из магнитной проволоки

$$k_{\delta б.к} = 1 + \frac{b_б(h_б + 0{,}8d)}{l_a(\delta + h_б - 0{,}8d) - b_б(h_б - 0{,}8d)}, \qquad (11.50\ д)$$

где d — диаметр бандажной проволоки.

Размеры и число бандажных канавок определяются предварительно и уточняются после механического расчета бандажа (см. гл. 8).

Таблица 11.16. **Данные для расчета магнитной цепи**

Участок магнитной цепи	Расчетная длина участка, м	Площадь сечения участка, м^2	Магнитный поток при нормальном режиме, Вб	Индукция в сечении участка, Тл
Воздушный зазор под главным полюсом	$L_\delta = k_\delta \delta$	$S_\delta = b'_p l_\delta = \alpha \tau l_\delta$	$\Phi_{\delta ном} = \frac{60 a E_н}{n_{ном} p N}$	$B_{\delta ном}$
Зубцы якоря овальной формы (см. рис. 11.13)	$L_Z = h_п - 0{,}2 r_1$	$S_Z = \frac{Z \alpha_\delta b_Z l_\delta k_c}{2p}$	$\Phi_{\delta ном}$	$B_Z = \frac{\Phi_{\delta ном}}{S_Z}$
Зубцы якоря прямоугольной формы (см. рис. 11.14)	$L_Z = h_п$	$S_{Z3} = \frac{\pi \alpha_\delta l_\delta}{2p}(D - 2h_п - Zb_п)k_c$	$\Phi_{\delta ном}$	$B_{Z3} = \frac{\Phi_{\delta ном}}{S_{Z3}}$
Ярмо якоря	$L_j = \frac{\pi(D_0 - h_j)}{4p} + \frac{h_j}{2}$	$S_j = l(h_j - 2/3d)k_c$	$\Phi_{\delta ном}$	$B_j = \frac{\Phi_{\delta ном}}{2S_j}$
Зубцы наконечника главного полюса (см. рис. 11.18) с компенсационной обмоткой	$L_{к\,п} = h_{к\,п}$	$S_{к.п} = (b_p - Z_к b_{к.п}) l_г k_c$	$\sigma_г \Phi_{\delta ном}$	$B_к = \frac{\Phi_{\delta ном} \sigma_г}{S_{к.п}}$
Сердечник главного полюса (см. рис. 11.19,11.18)	$L_г = h_г$	$S_г = l_г b_г k_c$	$\sigma_г \Phi_{\delta ном}$	$B_г = \frac{\Phi_{\delta ном} \sigma_г}{S_г}$
Зазор между главным полюсом и станиной	$L_{c\,п} = \delta_{c\,п} = 2l_г \cdot 10^{-4} + 10^{-4}$	$S_{c.п} = S_г$	$\sigma_г \Phi_{\delta ном}$	$B_{c\,п} = \frac{\Phi_{\delta ном} \sigma_г}{S_{c.п}} \approx B_г$
Станина	$L_c = \frac{\pi(D_{вн} + b_c)}{4p} + \frac{b_c}{2}$	$S_c = z_c h_c$	$\sigma_г \frac{\Phi_{\delta ном}}{2}$	$B_c = \frac{\Phi_{\delta ном} \sigma_г}{2S_c}$

Коэффициент

$$k_{в\,к} = 1 + \frac{3\delta}{l_п + 3\delta(1 + l_п / b_{в.к})}, \qquad (11.51)$$

где $l_п$ — длина пакета; $b_{в\,к}$ — ширина вентиляционного канала.

2. Расчетная ширина полюсной дуги $b'_p = b_p$ при эксцентричном lasope под главными полюсами и $b'_p = b_p + 2\delta$ при концентрическом зазоре под главными полюсами с компенсационной обмоткой.

3. Расчетная длина якоря l_δ равна длине пакета якоря l_{ct}, т. е. $l_\delta = l_a$ при отсутствии радиальных вентиляционных каналов и $l_\delta = l_п - n_к b_{в\,к}$ при наличии $n_к$ радиальных вентиляционных каналов шириной $b_{в\,к}$ каждого канала.

4. Расчетная длина станины k для машин постоянного тока может быть принята:

$$l_c = l_г + 0{,}4D, \qquad (11.52)$$

где $l_г$ — длина главного полюса.

5. Высоту главного полюса $h_г$ для машин постоянного тока с диаметром якоря до 0,5 м предварительно можно определить по рис. 11.23. При $D > 0{,}5$ м для предварительного определения высоты полюса необходимо использовать установленные зависимости $D_{вн} = \varphi(D; p)$ приведенные на рис. 11.5.

6. Высота станины h_c определяется при известных радиальных размерах магнитной системы:

$$h_c = \frac{D_{вн} - (D + 2\delta)}{2} - h_г - h_{г\,н}, \qquad (11.53)$$

где $h_{г\,н}$ — высота наконечника главного полюса (см. рис. 11.19), выбирается исходя из условия, чтобы магнитная индукция в сечении $a_г c_г$ не превышала 1,8...1,9 Тл; индукция в станине из массивной стали не должна превышать B_c = 1,3 Тл (1,05 Тл при классе изоляции Н). Увеличение магнитной индукции сверхустановленных значении приводит, в первую очередь, к ухудшению коммутации машины.

7. Ширина выступа наконечника главного полюса $b_{г.в}$ может быть принята равной $(0{,}1 \ldots 0{,}15) b_г$.

Ширина сердечника главного полюса

$$b_г = \sigma_г \Phi_{\delta ном} / (k_c l_г B_г), \qquad (11.54)$$

где $B_г$ — индукция в сердечнике главного полюса. Для сталей марок 3411, 3412, 3413 $B_г$= 1,6…1,7 Тл, для сталей марок 1211 и 1212 $B_г$ 1,35…1,55 Тл. При исполнении машины по степени

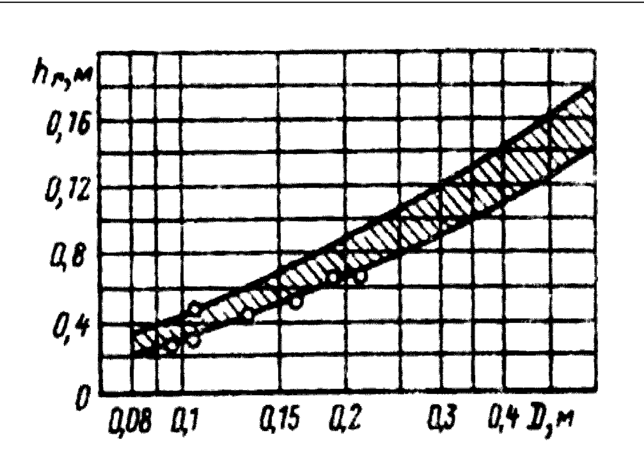


Рис. 11.23. К определению высоты главного полюса

Таблица 11.17. **Расчет характеристики намагничивания машины**

п/п	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0{,}5\Phi_{\delta ном}$	$0{,}75\Phi_{\delta ном}$	$0{,}9\Phi_{\delta ном}$	$1{,}0\Phi_{\delta ном}$	$1{,}1\Phi_{\delta ном}$	$1{,}15\Phi_{\delta ном}$
1	ЭДС	E	В						
2	Магнитный поток	$\Phi_\delta = \frac{60\text{àÅ}}{\text{ð}Nn}$	Вб						
3	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_\delta = \frac{\hat{O}_\delta}{\alpha_\delta \tau l_\delta}$	Тл						
4	МДС воздушного зазора	$F_\delta = 0{,}8 B_\delta L_\delta \cdot 10^6$	А						
5	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_{Z1} = k_{Z1} B_\chi$ $B_{Z2} = k_{Z2} B_\chi$ $B_{Z3} = k_{Z3} B_\chi$	Тл Тл Тл						
6	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря (см. приложение 2)	H_{Z1} H_{Z2} H_{Z3}	А/м А/м А/м						
7	Средняя напряжен ность магнитного поля в зубцах	$H_{Zcp} = \frac{H_{Z1} + 4H_{Z2} + H_{Z3}}{6}$	А/м						
8	Магнитное напряжение	$F_Z = L_Z H_{Zcp}$	А						
9	Магнитная индукция в спинке якоря	$B_j = \hat{O}_\delta/(2S_j)$	Тл						
10	Напряжен ность магнитного поля в спинке якоря (см. приложение 1)	H_j	А/м						
11	Магнитное напряжение спинки якоря	$F_j = L_j H_j$	А						
12	Магнитный поток главного полюса	$\Phi_г = \sigma_г \Phi_\delta$	Вб						

Продолжение табл. 11.17

13	Магнитная индукция в сердечнике главного полюса	$B_г = Ф_г / S_г$	Тл						
14	Напряжен-ность магнитного поля в сердечнике главного полюса	$H_г$	А/м						
15	Магнитное напряжение сердечника главного полюса	$F_г = L_г H_г$	А						
16	Магнитная индукция в зубцах наконечника главного полюса (компенсационной обмотки)	$B_{Zк} = \dfrac{\sigma_c Ф_{δном}}{S_{к.п}}$	Тл						
17	Напряжсн ность магнитного поля в зубцах компенсационной обмотки	$H_{Zк}$	А/м						
18	Магнитное напряжение зубцов наконечника главного полюса	$F_{к.п} = L_{к.п} H_{Zк}$	А						
19	Магнитная индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной	$B_{c.п} = B_c$	Тл						
20	Магнитнос напряжение воздушного зазора между станиной и главным полюсом	$F_{c.п} = 0{,}8 L_{c.п} B_c \cdot 10^6$	А						
21	Магнитная индукция в станине	$B_c = \dfrac{\sigma_c Ф_δ}{2S_c}$	Тл						

Продолжение табл. 11.17

22	Напряженность магнитного поля в станине	H_c	А/м							
23	Магнитное напряжение станины	$F_c = L_c H_c$	А							
24	Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи	$F_\delta + F_Z + F_j + F_г + F_{Z\hat{e}} + F_{\tilde{n}.\ddot{i}} = F_\Sigma$	А							
25	Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя	$F_\delta + F_Z + F_j = F_{\delta Zj}$	А							

Примечание. При определении магнитного напряжения зубцового слоя следует определить напряженность магнитного поля по кривым приложения 2, которые построены при $B_я > 1{,}8$ Тл с учетом вытеснения магнитного поля в паз.

Для открытых пазов (см. рис. 11.14):

$$k_{Z1} = \frac{t_{Z1} l_\delta}{b_{Z1} l_a k_c};\ k_{Z2} = \frac{t_{Z2} l_\delta}{b_{Z2} l_a k_c};\ k_{Z3} = \frac{t_{Z3} l_\delta}{b_{Z3} l_a k_c};$$

для овальных пазов (см рис. 11.13):

$$k_{Z1} = \frac{t_{Z1} l_\delta}{b_{Z1} l_a k_c};\ k_{Z2} = \frac{t_{Z2} l_\delta}{b_{Z} l_a k_c};\ k_{Z3} = \frac{t_{Z3} l_\delta}{b_{Z} l_a k_c}.$$

защиты IP44 и способам охлаждения IC0141 и IC0041 индукция $B_с$, должна быть снижена на 0,2—0,3 Тл.

8. Коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов $\sigma_г$ зависит от воздушного зазора, ширины межполюсного окна $\tau - b_p$ и ширины полюсного наконечника добавочного полюса.

В каждом конкретном случае путем моделирования магнитного поля в воздушном зазоре можно определить $\sigma_г$.

При расчетах магнитных цепей машин постоянного тока можно принять $\sigma_г$ = 1,15 для двухполюсных машин, $\sigma_г$ = 1,2 для четырехполюсных машин без компенсационной обмотки, $\sigma_г$ = 1,25 при $2p$ = 4 и 6 и наличии компенсационной обмотки.

Для построения характеристики намагничивания машины постоянного тока необходимо определить сумму МДС всех участков магнитной цепи при значениях магнитного потока в воздушном зазоре Φ_δ = 0,5; 0,75; 0,9; 1,1 и 1,15 $\Phi_{\delta ном}$.

Расчет характеристики намагничивания производится по привеченной в табл. 11.17 форме.

По данным табл. 11.17 строят характеристику намагничивания машины постоянного тока $B_\delta = f(F_\Sigma)$ и переходную характеристику

$$B_\delta = \varphi(F_{\delta Zj}). \qquad (11.55)$$

11.7. РАСЧЕТ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Магнитодвижущая сила обмоток параллельного или независимого возбуждения на один полюс при нагрузке, А,

$$F_B = F_\Sigma + F_{qd} \pm F_d - F_c, \qquad (11.56)$$

где F_d— продольная составляющая реакции якоря, возникающая при сдвиге щеток с геометрической нейтрали на относительную дугу x: $F_d = 2Ax$; F_c — МДС стабилизирующей обмотки; F_{qd} — размагничивающее действие поперечной реакции якоря.

При компенсации реакции якоря компенсационной обмотки составляющая F_{qd} принимается равной нулю.

Конструкции изоляции и крепления обмоток главных полюсов приведены в табл. 11.2, 11.3.

Средняя длина витка обмотки главного полюса (рис. 11.24), м,

$$l_{d\ cp} = 2(l_г + b_г) + \pi(b_{кт.в} + 2\Delta_{из}), \qquad (11.57)$$

где $\Delta_{из}$ — толщина изоляции катушки по табл. 11.2, 11.3 плюс односторонний

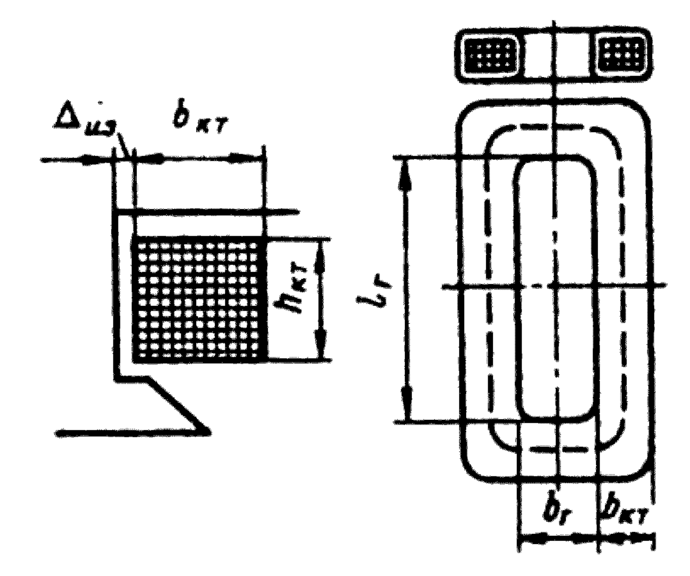


Рис. 11.24. К определению размеров катушек обмоток главных полюсов

зазор между катушкой и полюсом, который принимается равным $(0{,}5...0{,}8)\cdot10^{-3}$ м при диаметрах якоря до 0,5 м.

Площадь сечения проводника обмотки при последовательном соединении катушек, м^2,

$$q_B = \frac{\rho_\vartheta k_з 2pF_B l_{B\,ср}}{U_B}, \qquad (11.58)$$

где $k_з$ — коэффициент запаса МДС обмотки возбуждения: $k_з$ = 1,1...1,2.

Марка и размеры проводов обмоток возбуждения выбираются в соответствии с табл. 11.18.

Таблица 11.18. **Марка и размеры проводов обмоток возбуждения**

Сечение, м^2	Марка провода	Тип обмотки
Менее $8\cdot10^{-6}$	ПЭТВ, ПЭТ-155, ПСД, ПСДК	Многослойная катушка; проводники круглого сечения
$(8—25)\cdot10^{-6}$	ПЭТВП, ПЭТП-155, ПСД, ПСДК	Многослойная катушка; проводники прямоугольного сечения с отношением сторон 1,4 — 1,8
Более $25\cdot10^{-6}$	Голая шинная медь	Однослойная по ширине катушка с намоткой меди на ребро

Многослойные катушки из проводников круглого сечения выполняют сплошными. Размеры катушек (рис. 11.24) ориентировочно могут быть приняты в зависимости от диаметра якоря:

D, м	0,09	0,106	0,110
$b_{к.т}\times h_{кт}$, м	$0{,}023\times0{,}019$	$0{,}032\times0{,}018$	$0{,}024\times0{,}023$
D, м	0,132	0,156	0,018
$b_{к\,т}\times h_{кт}$, м	$0{,}025\times0{,}03$	$0{,}025\times0{,}038$	$0{,}03\times0{,}04$

Катушки обмоток возбуждения машин с диаметром якоря свыше 0,2 м выполняют секционированными. Это увеличивает поверхность охлаждения обмоток и позволяет повысить плотность тока в обмотке возбуждения.

Проводники прямоугольного сечения и проводники из шинной меди наматываются плашмя, меньшей стороной сечения проводника по высоте катушки.

Для расчета числа витков необходимо задаться плотностью тока J_B в обмотке возбуждения. Средние значения J_B могут быть приняты равными $(2...3)\cdot10^6$ А/м^2 при исполнении по степени зашиты IP44 и $(4{,}5...6)\cdot10^6$ А/м^2 при исполнении по степени защиты IP22.

Число витков обмотки на один полюс

$$w_B = F_B / J_B q_B, \qquad (11.59)$$

где $J_B q_B = I_{B.ном}$ — номинальный ток возбуждения.

При укладке обмотки в межполюсном окне необходимо обеспечить воздушные промежутки между краями главных и добавочных полюсов и выступающими краями катушек и внутренней поверхностью станины не менее (6...8)·10^{-3} м.

Площадь сечения катушки, м^2,

$$S_{кт} = w_B d_{из}^2 / k_{з.в}, \qquad (11.60)$$

где $d_{из}$ — диаметр изолированного провода (при проводах прямоугольного сечения необходимо вместо $d_{из}$ ввести $a_{пр} \times b_{пр}$); $k_{з.в}$ — коэффициент заполнения, определяющий разбухание катушки.

Окончательные размеры катушек обмоток возбуждения устанавливаются после размещения в межполюсном окне главных и добавочных полюсов. Если площадь межполюсного окна не позволяет разместить обмотки, то необходимо увеличить внутренний диаметр станины.

Сопротивление обмотки возбуждения, Ом,

$$R_в = \rho_9 2 p w_B l_{B.ср} / q_B. \qquad (11.61)$$

Масса меди параллельной обмотки, кг,

$$m_{M\ B} = 17{,}8 p l_{B\ ср} w_B q_B \cdot 10^3. \qquad (11.62)$$

Максимальный ток обмотки возбуждения, А,

$$I_{Bvax} = U_B / R_B. \qquad (11.63)$$

Коэффициент запаса

$$k_з = I_{B\max} w_B / F_B, \qquad (11.64)$$

где $k_з$ должен быть не менее 1,1.

На главных полюсах машин без компенсационных обмоток параллельного или независимого возбуждения в целях повышения устойчивости работы двигателя и частичной компенсации реакции якоря выполняют стабилизирующую обмотку, которая соединяется последовательно с обмоткой якоря и обмоткой добавочных полюсов. Конструктивно стабилизирующая обмотка располагается либо у полюсного наконечника, либо между секциями катушек главных полюсов, при этом она одновременно выполняет роль дистанционной прокладки.

Плотность тока J_c стабилизирующей обмотки принимают в первом приближении равной плотности тока в обмотках главных полюсов.

Число параллельных ветвей стабилизирующей обмотки принимают равным числу ветвей компенсационной обмотки и обмотки добавочных полюсов.

Число витков на один полюс стабилизирующей обмотки

$$w_c = F_{qd} a_Д / I, \tag{11.65}$$

где F_{qd} — размагничивающее действие поперечной реакции якоря, А; I — ток якоря, А; $a_Д$ — число параллельных ветвей обмотки добавочных полюсов.

Полученное число витков округляют до ближайшего целого числа. Марка провода и конструкция обмотки выбираются согласно табл. 11.18.

Средняя длина витка обмотки, м,

$$l_{c.ср} = 2(l_c + b_c) + \pi(b_{кт\,c} + 2\Delta_{из})$$

где $\Delta_{из}$ — толщина изоляции катушки согласно табл. 11.2 и 11.3 плюс односторонний зазор между катушкой и полюсом, который принимается равным $(0,5...0,8)\cdot 10^{-3}$ при диаметрах якоря до 500 мм; $b_{кт\,c}$ — ширина катушки, которая определяется после выбора марки провода и размещения обмотки в межполюсном окне.

Сопротивление стабилизирующей обмотки, Ом,

$$R_c = \rho_э \frac{2 p w_c l_{c\,ср}}{q_c}. \tag{11.67}$$

11.8. РАСЧЕТ КОММУТАЦИИ

Коммутационную надежность машин постоянного тока обычно оценивают по ширине зоны безыскровой работы машины $\Delta I_{Дп} = f(I_a)$, границы которой определяют экспериментально по значениям токов подпитки или отпитки $\Delta I_{Дп}$ добавочных полюсов, вызывающих появление искрения под сбегающими краями щеток. ГОСТ 183—74 устанавливает, что при номинальном режиме работы машины степень искрения не должна превышать класса 1,5. При этом уровне искрения наблюдается лишь слабое точечное искрение под большей частью электрощетки, которое, однако, не должно оказывать существенного влияния на срок службы коллекторно-щеточного узла машины [6].

Косвенным критерием оценки коммутационной напряженности является реактивная ЭДС E_p, которая индуктируется в замкнутой накоротко секции во время ее коммутации.

Для машин с высотой оси вращения до 200 мм ЭДС E_p не должна превышать 2,5...3,5 В. В машинах с высотой оси вращения до 355 мм максимально допустимая ЭДС $E_{p\max}$ может достигать 5 В.

Реактивная ЭДС коммутируемой секции, В,

$$E_p = 2w_c l_a A v_a \lambda \cdot 10^{-6}, \qquad (11.68)$$

где w_c— число витков в секции; l_a — длина якоря, м; A — линейная нагрузка, А/м; $v_a = \pi D n_{ном}/60$ — окружная скорость якоря, м/с; λ — приведенная удельная магнитная проводимость пазового рассеяния. Для овальных полузакрытых пазов (см. рис. 11.13)

$$\lambda = 0{,}6\frac{h_п}{2r_2} + \frac{h_ш}{b_ш} + \frac{l_л}{l_a} + \frac{2{,}5 \cdot 10^5}{w_c l_a A v_a} \cdot \frac{a}{p}; \qquad (11.69)$$

для прямоугольных пазов (см. рис. 11.14)

$$\lambda = 0{,}6\frac{h_п}{b_п} + \frac{l_л}{l_a} + \frac{2{,}5 \cdot 10^5}{w_c l_a A v_a} \cdot \frac{a}{p}; \qquad (11.70)$$

Так как активные стороны секций вступают в процесс коммутации не одновременно, а через определенные интервалы времени, зависящие от ширины щетки, коэффициента укорочения обмотки, числа секционных сторон в пазу и т. д., то расчет результирующей проводимости пазового рассеяния представляет собой довольно трудоемкую задачу.

По формулам (11.68)—(11.70) с достаточной точностью можно рассчитать ЭДС коммутации для машин общего назначения, когда диаметр якоря не превышает 300 мм, а условия коммутации не являются напряженными.

Для расчета коммутации напряженных в коммутационном отношении машин, а также машин с диаметром якоря свыше 300 мм используют зависимости, определяющие средний за период коммутации эффект взаимодействия секций, расположенных в одном пазу. В этом случае средний результирующий коэффициент удельной проводимости пазового рассеяния

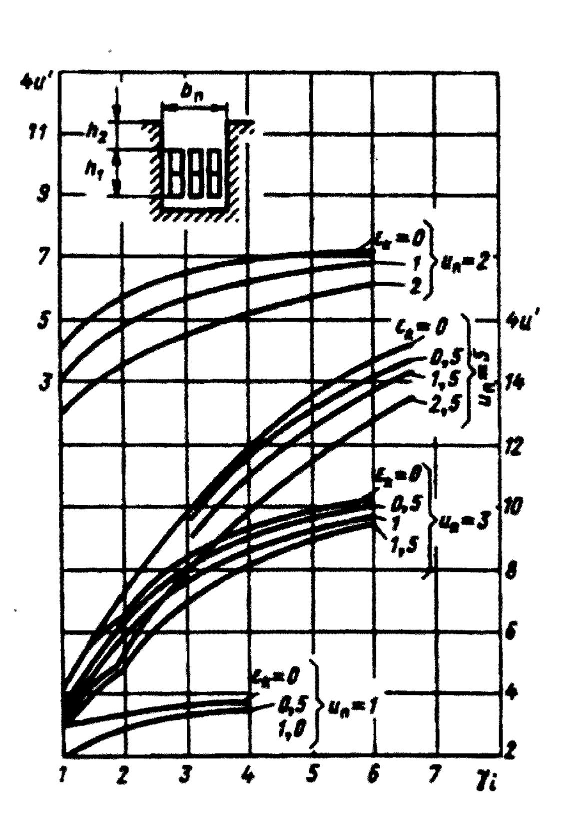


Рис. 11.25. К расчету результирующего коэффициента проводимости пазового рассеяния

$$\lambda'_п = \frac{4u'}{2y_i}(\lambda_п + \lambda_{к.Д}) + \lambda_л \cdot \frac{l_Д}{l_a}. \qquad (11.71)$$

Здесь коэффициент $4u'$ принимается по рис. 11.25;

$$\lambda_п = 1{,}25\frac{h_1}{3b_п} + \frac{h_2}{b_п}, \qquad (11.72)$$

где размеры $h_1, h_2, b_п$ — по рис. 11.25,

$$\lambda_{к\,Д} = b_{Z1} / 2\delta_Д, \qquad (11.73)$$

b_{Z1} — по рис. 11.14; $\delta_Д$ — воздушный зазор под добавочным полюсом предварительно принимается $\delta_Д \approx 0{,}02D; \lambda_Д = 0{,}75$ при бандажах на лобовой части обмотки якоря из магнитной проволоки и $\lambda_Д$ = 0 5 при стеклобандажах и бандажах из немагнитной проволоки; y_t — относительная ширина щетки, определяющая число одновременно коммутируемых секций:

$$y_t = \frac{b_щ}{t_к} + (1 + \frac{a}{p}), \qquad (11.74)$$

где $t_к$ — коллекторное деление.

При расчете λ по (11.69), (11.70) необходимо предварительно выбрать ширину щетки. Ширина щетки принимается $b_щ = (2...4)t_к$ при простых волновых обмотках, $b_щ = u_п + 0{,}5$ при простых петлевых обмотках и $b_щ > 3t_к$ при двухходовых петлевых обмотках.

Ширина щетки $b_щ$ определяет ширину зоны коммутации $b_{з.к}$, т.е. ширину дуги окружности поверхности якоря, в границах которой находятся коммутируемые секции:

$$b_{з.к} = \left(\frac{b_щ}{t_к} + u_п - \frac{a}{p} + e_к\right) t_к \frac{D}{D_к}. \qquad (11.75)$$

Диаметр коллектора $D_к$ коллекторное деление $t_к$, а также $u_п$ выбирают согласно данным § 11.4; укорочение обмотки в коллекторных делениях $\varepsilon_к = K/(2p) - y_1$ принимают всегда со знаком плюс. Ширина щетки должна обеспечить ширину зоны коммутации:

$$b_{з.к} \le (0{,}55...0{,}7)(\tau - b_p), \qquad (11.76)$$

где $\tau - b_p = b_{н.з}$ — ширина нейтральной зоны.

Верхние границы этого отношения относятся к машинам с диаметром якоря до 0,2 м, нижние значения принимаются при диаметрах якоря выше 0,4 м. При отсутствии добавочных полюсов в машинах малой мощности отношение $b_{з.к}/(\tau - b_p)$ можно выбивать в пределах 0,8—1,25.

Принятое значение ширины щетки округляется до ближайшего стандартного размера $b_щ$ (см. табл. П4.1).

При выборе ширины зоны коммутации следует иметь в виду что увеличение ширины зоны коммутации приводит к сокращению числа проводников якоря, участвующих в создании электромагнитного момента, что влечет увеличение тока в якоре и ухудшение

условий коммутации. Поэтому желательно, чтобы щетки перекрывали не более двух-трех коллекторных пластин.

Выбор марки щеток для машин постоянного тока — весьма сложная задача, так как от марки щеток зависят коммутация машины и срок службы коллекторно-щеточного узла. На практике марку щеток определяют в соответствии с условиями работы согласно табл. П4.2, где приведены основные технические данные марок наиболее распространенных щеток и области их применения.

Контактная площадь всех щеток, м^2,

$$\sum S_щ = \frac{2I_{ном}}{J_щ} \cdot 10^4 , \qquad (11.77)$$

где $J_щ$ — плотность тока в щеточном контакте, А/см^2 (см. табл. П4.2). Контактная площадь щеток одного бракета (щеточного болта)

$$S_{щ\,б} = \sum S_щ /(2p) . \qquad (11.78)$$

По табл. П4.1 выбирают длину $l_щ$ одной щетки, определяют площадь щеточного контакта одной щетки $S_щ = b_щ l_щ$ и рассчитывают число щеток на один щеточный болт:

$$S_{щ.б} / S_щ = N_щ . \qquad (11.79)$$

По выбранным размерам щеток $b_щ, l_щ$ и $N_щ$ определяют фактически контактную площадь и уточняют плотность тока в щеточном контакте $J_щ$.

Активная длина коллектора при шахматном расположении щеток по длине коллектора, м,

$$l_к = N_щ (l_щ + 0{,}008) + 0{,}01 , \qquad (11.80)$$

где $l_щ$ — длина щетки, м.

Механический расчет коллекторов приведен в гл. 8.

11.9. РАСЧЕТ ДОБАВОЧНЫХ ПОЛЮСОВ

Магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов должна создать в зоне коммутации магнитное поле, индуктирующее в коммутируемой секции ЭДС коммутации $E_к$, направленную встречно реактивной ЭДС $E_р$. Электродвижущая сила $E_к$ должна быть несколько больше $E_р$, чтобы процесс коммутации протекал с некоторым ускорением. При расчете индукции в воздушном зазоре под добавочными полюсами $B_{\delta Д}$ принимают расчетное значение реактивной ЭДС $E_р = (1{,}05...1{,}1)\ E_р$.

В этом случае индукция $B_{\delta Д}$, Тл,

$$B_{\delta Д} = E_р /(2 w_c l_\delta v_а) . \qquad (11.81)$$

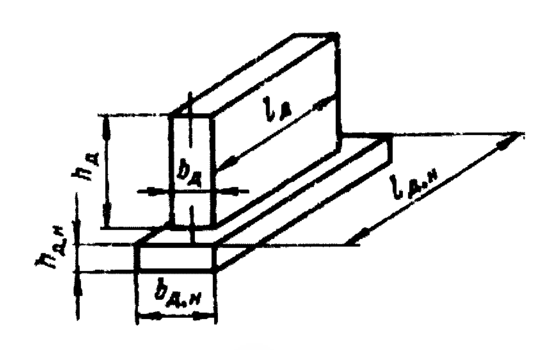


Рис. 11.26. Размеры добавочных полюсов

Ширина наконечника добавочного полюса (рис. 11.26), м,

$$b_{Д.н} \le (0{,}55...0{,}75) b_{з.к}. \qquad (11.82)$$

Длину наконечника добавочного полюса $l_{Д.н}$ принимают равной длине якоря: $l_{Д.н} = l_a$. Магнитный поток добавочного полюса в воздушном зазоре в зоне коммутации, Вб,

$$\Phi_{\delta Д} = B_{\delta Д} b'_{Д.н} l_{Д.н}, \qquad (11.83)$$

где $b'_{Д.н} = b_{Д.н} + 2\delta_Д$ — расчетная ширина полюсного наконечника добавочного полюса.

Магнитный поток в сердечнике добавочного полюса, Вб,

$$\Phi_Д = \sigma_Д \Phi_{\delta Д}, \qquad (11.84)$$

где $\sigma_Д$ — коэффициент рассеяния добавочных полюсов; $\sigma_Д$ = 2,5...3,5 для машин без компенсационной обмотки; $\sigma_Д$ = 2 для машин с компенсационной обмоткой.

Ширину сердечника добавочного полюса $b_Д$ предварительно определяют по зависимости на рис. 11.27, *а*. Длину сердечника добавочного полюса $l_Д$ принимают равной длине якоря; для машин с диаметром якоря до 0,132 м длина $l_Д$ короче длины полюсного наконечника на $(5...10)\cdot 10^{-3}$ м.

Индукция в сердечнике добавочного полюса, Тл,

$$B_{с Д} = \Phi_Д / (b_Д l_Д). \qquad (11.85)$$

Она не должна превышать 1,6 Тл.

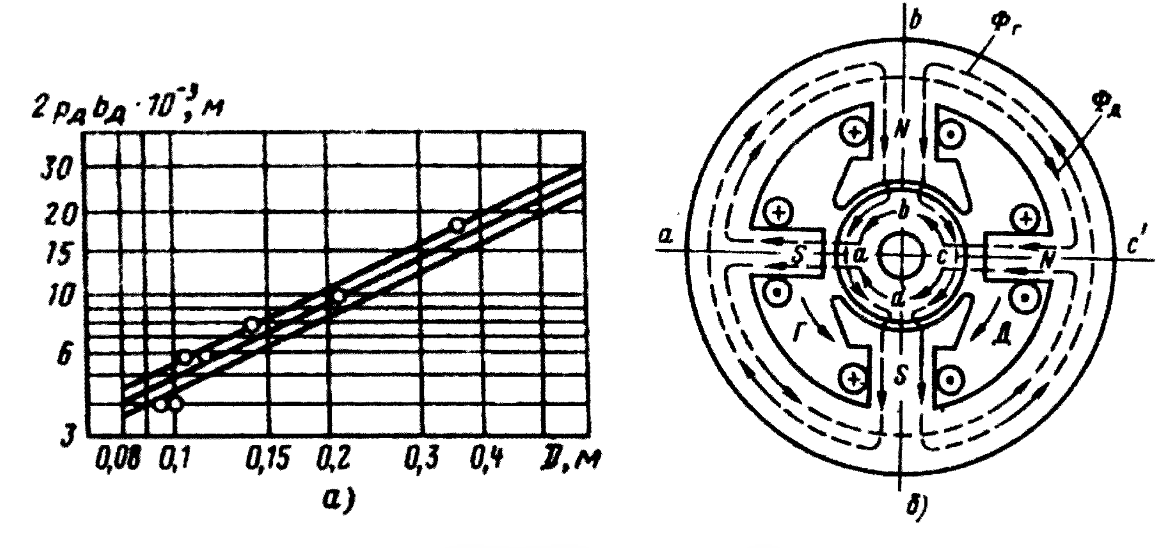


Рис. 11.27. К расчету магнитной цепи добавочных полюсов:
а — зависимость ширины добавочного полюса от диаметра якоря;
б — магнитные цепи главных и добавочных полюсов

Сердечники добавочных полюсов выполняют из стали марки Ст3 при диаметрах якоря до 0,16 м, при больших диаметрах — из тегов электротехнической стали марки 3411 толщиной 1,0 мм. В зависимости от отношения ширины полюсного наконечника к ширине сердечника форма поперечного сечения добавочного полюса может быть прямоугольной (см. рис. 11.26) и прямоугольной со скошенным наконечником при $b_{Ди} < b_Д$.

Для расчета МДС обмотки добавочных полюсов необходимо определить магнитные напряжения отдельных участков и полную МДС магнитной цепи на один полюс в соответствии с табл. 11.19.

Таблица 11.19. **Расчет МДС обмотки добавочных полюсов**

№ п/п	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
1	Магнитный поток в воздушном зазоре	$\hat{O}_{\delta д}$	Вб	
2	Магнитная индукция в воздушном зазоре	$\hat{A}_{\delta д} = \dfrac{\hat{O}_{\delta д}}{\alpha_д l_L}$	Тл	
3	Магнитное напряжение воздушного зазора	$F_{\delta д} = 0{,}8\delta_д k_{\delta д} \cdot 10^6$	А	
4	Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_{Z1} = k_{Z1} B_{\delta д}$ $B_{Z2} = k_{Z2} B_{\delta Ä}$ $B_{Z3} = k_{Z3} B_{\delta д}$	Тл Тл Тл	
5	Напряженность магнитного поля в зубцах якоря по приложению 1	H_{Z1} H_{Z2} H_{Z3}	А/м А/м А/м	
6	Средняя напряженность магнитного поля в зубцах	$H_{Zcp} = \dfrac{H_{Z1} + 4H_{Z2} + H_{Z3}}{6}$	А/м	
7	Магнитное напряжение зубцов	$F_z = H_z L_{zcp}$	А/м	
8	Магнитная индукция в спинке ярма: на участке согласного направления главного потока добавочных полюсов на участке встречного направления главного потока и потока добавочных полюсов	$\hat{A}_{j1} = \dfrac{\hat{O}_\delta + \hat{O}_{\delta д}}{2S_j}$ $\hat{A}_{j2} = \dfrac{\hat{O}_\delta - \hat{O}_{\delta д}}{2S_j}$	Тл Тл	
9	Напряженность магнитного поля: на участке с индукцией B_{j1} на участке с индукцией B_{j2} средняя напряженность магнитного поля в ярме	H_{j1} H_{j2} $H_{jcp} = (H_{j1} - H_{j2})/2$	А/м А/м А/м	
10	Магнитное напряжение ярма якоря	$F_j = H_{jcp} L_j$	А	

Продолжение таблицы 11.19

№ П/П	Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
11	Магнитный поток добавочного полюса	$\hat{O}_{д} = \sigma_{д}\hat{O}_{\delta д}$	Вб	
12	Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса	$\hat{A}_{с.д} = \dfrac{\hat{O}_{д}}{b_{д} r_{д}}$	Тл	
13	Напряженность магнитного поля в сердечнике добавочного полюса	$H_{с.д}$	Тл	
14	Магнитное напряжение в сердечнике добавочного полюса	$F_{с.д} = H_{с.д} h_{д}$	А	
15	Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и добавочным полюсом	$F_{\delta с.д.п} = 0{,}8\hat{A}_{д}\delta_{с.д.п} \cdot 10^{6}$	А	
16	Магнитная индукция в станине: на участке согласного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов на участке встречного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$\hat{A}_{с1} = \dfrac{\hat{O}_{г} + \hat{O}_{д}}{2S_{с}}$ $\hat{A}_{с2} = \dfrac{\hat{O}_{г} - \hat{O}_{д}}{2S_{с}}$	Тл Тл	
17	Напряженность магнитного поля в станине: на участке с индукцией B_{c1} на участке с индукцией B_{c2}	$H_{с1}$ $H_{с2}$	А/м А/м	
18	Средняя напряженность магнитного поля в станине	$H_{с.ср} = \dfrac{H_{с1} - H_{с2}}{2}$	А/м	
19	Магнитное напряжение участка станины	$F_{с} = H_{с.ср} L_{с}$	А	
20	Сумма магнитных напряжений всех участков	$F_{д\Sigma} = F_{\delta д} + F_{Z} + F_{J} +$ $+ F_{с.д} + F_{\delta с.д.п} + F_{с}$	А	
21	МДС обмотки добавочного полюса	$F_{д} = F_{д\Sigma} + \dfrac{\grave{A}\tau}{2}$	А	

Распределение магнитных потоков главных полюсов $\Phi_г$ и добавочных полюсов $\Phi_д$ в магнитной системе машины показано на рис. 11.27, *б*.

Магнитодвижущая сила обмотки добавочных полюсов для машин постоянного тока без компенсационной обмотки находится в пределах

$$F_Д = (1{,}2...1{,}4)A\frac{\tau}{2}. \qquad (11.86)$$

Число витков обмотки на один добавочный полюс

$$w_Д = (F_Д a_Д)/I, \qquad (11.87)$$

где $a_Д$ — число параллельных ветвей обмотки добавочного полюса, обычно $a_Д$ равно числу параллельных ветвей компенсационной обмотки; число витков округляется до ближайшего целого числа. Сечение провода обмотки добавочных полюсов, м^2,

$$q_Д = I/(a_Д J_Д). \qquad (11.88)$$

Средние значения $J_Д$ машин постоянного тока при исполнении по степени защиты IP44 могут быть приняты равными (2...3)·10^6 А/м^2, при исполнении по степени защиты IP22 (4,5...6,5)·10^6 А/м^2.

Марку провода и тип обмотки добавочных полюсов выбирают согласно приложению 1. По выбранному стандартному сечению проводника уточняют плотность тока $J_Д$.

После проверки размещения катушек главных и добавочных поносов с учетом принятых припусков на разбухание катушек (см. 5 11.7) определяют окончательные размеры витка катушки, м,

$$l_{Д\,ср} = 2(b_Д + l_Д) + \pi(b_{кт\,Д} + 2\Delta_{из}), \qquad (11.89)$$

где $b_Д$ и $l_Д$ — ширина и длина сердечника добавочного полюса; $b_{кт\,Д}$ — ширина катушки добавочного полюса; $\Delta_{из}$ — односторонний размер зазора между сердечником добавочного полюса и катушкой с учетом изоляции сердечника: $\Delta_{из}$ = (1,7...2,2)·10^{-3} м при диаметрах якоря до 500мм.

Сопротивление обмотки добавочного полюса в холодном состоянии, Ом,

$$R_Д = \rho_э \frac{2p_Д l_{Д.ср} w_Д}{q_Д a_Д^2}. \qquad (11.90)$$

Масса меди обмотки добавочных полюсов, кг,

$$m_Д = 8900 l_{Д.ср} w_Д 2p_Д q_Д. \qquad (11.91)$$

11.10. ПОТЕРИ И КПД. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Коэффициент полезного действия машины, %,

$$\eta = \frac{P_{ном}}{P_1}100 = \frac{P_{ном}}{P_{ном} + \sum P}100, \qquad (11.92)$$

где $P_{ном}$ — номинальная полезная мощность машины, кВт; $\sum P$ — сумма потерь в машине, кВт; P_1 — потребляемая мощность, кВт.

Сумма потерь в машине в общем случае, кВт,

$$\sum P = P_{эа} + P_{э.с} + P_{э.в} + P_{э.Д} + P_{э.к} + P_{щ} + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб}, \qquad (11.93)$$

где $P_{эа}$ - электрические потери в обмотке якоря; $P_{э.с}$ - то же, в стабилизирующей обмотке; $P_{э.в}$ - то же, в обмотке параллельного возбуждения; $P_{э.д}$ - то же, в обмотке добавочных полюсов; $P_{э.к}$ - то ж компенсационной обмотке; $P_{щ}$ - то же, в переходном контакте щеток; $P_{ст}$ - магнитные потери в стали якоря; $P_{мех}$ - суммарные механические потери; $P_{доб}$ - добавочные потери.

Электрические потери в обмотке якоря, кВт,

$$P_{эа} = I^2 R_a \cdot 10^{-3}. \qquad (11.94)$$

Электрические потери в стабилизирующей обмотке, кВт,

$$P_{э.с} = I^2 R_c \cdot 10^{-3}. \qquad (11.95)$$

Электрические потери в цепи обмотки параллельного возбуждения, кВт,

$$P_{э.в} = I^2 R_в \cdot 10^{-3} = \frac{U_в^2}{R_в} \cdot 10^{-3} \qquad (11.96)$$

Электрические потери в обмотке добавочных полюсов, кВт,

$$P_{э Д} = I^2 R_Д \cdot 10^{-3}. \qquad (11.97)$$

Электрические потери в компенсационной обмотке, кВт,

$$P_{э.к} = I^2 R_к \cdot 10^{-3}. \qquad (11.98)$$

Электрические потери в переходном контакте щеток, кВт,

$$P_{щ} = 2\Delta U_{щ} I \cdot 10^{-3}. \qquad (11.99)$$

Значение $2\Delta U_{щ}$ определяют для конкретной марки щеток по табл. П4.2.
Магнитные потери в стали зубцов и ярма якоря, кВт,

$$P_{ст} = 2{,}3 \rho_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} (B_Z^2 m_Z + B_j^2 m_j). \qquad (11.100)$$

Масса стали зубцов якоря с овальными пазами, кг,

$$m_Z = 7800 Z b_Z (h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2}) l_\delta k_c. \qquad (11.101)$$

Масса стали зубцов с прямоугольными пазами, кг,

$$m_Z = 7800 Z b_{Zср} h_p l_\delta k_c. \qquad (11.102)$$

Масса спинки ярма станины, кг,

$$m_j = 7800\frac{\pi(D-2h_n)^2 - D_0^2}{4} l_\delta k_c. \qquad (11.103)$$

При наличии аксиальных каналов в спинке ярма необходимо уменьшить площадь сечения стали ярма на значение, равное площадь поперечного сечения всех каналов. Сумма механических потерь, кВт,

$$P_{мех} = P_{т\,щ} + P_{вент} + P_{т\,п}, \qquad (11.104)$$

где $P_{т\,щ}$ — потери на трение щеток о коллектор; $P_{вент} + P_{т\,п}$ — потери на вентиляцию и трение в подшипниках.

При принятых значениях удельного нажатия на щетку и коэффициенте трения щеток о коллектор, составляющем $f \approx 0{,}25$, потери на трение в щеточном контакте, кВт,

$$P_{т\,щ} \approx 7{,}5\sum S_щ v_к, \qquad (11.105)$$

где $\sum S_щ$ — суммарная площадь контакта всех щеток, м^2; $v_к$ — окружая скорость коллектора, м/с.

Средние значения потерь $P_{вент} + P_{т.п}$ можно определить по рис. 11.28. Семейство кривых $А$ на этом рисунке относится к машинам с вентиляторами, установленными на валу машины, семейство кривых $Б$ — к машинам, приводные двигатели вентиляторов которых не установлены на машинах.

Добавочные потери при номинальной нагрузке, кВт:

для некомпенсированных машин

$$P_{доб} = 0{,}01\frac{P_{ном}}{\eta_{ном}}; \qquad (11.106)$$

для компенсированных машин

$$P_{доб} = 0{,}05\frac{P_{ном}}{\eta_{ном}}, \qquad (11.107)$$

где $\eta_{ном}$ — предварительное значение КПД по рис. 11.7. При номинальной нагрузке КПД определяют в следующем порядке. Задают значения тока якоря $I = 0{,}1I_{ном}$; $I = 0{,}25I_{ном}$; $I = 0{,}5I_{ном}$; …; $I = I_{ном}$; $I \approx 1{,}25I_{ном}$.

Для каждого значения тока определяют мощность, кВт,

$$P_1 = U_{ном}I\cdot 10^{-3} + U_B I_{Bном}\cdot 10^{-3}. \qquad (11.108)$$

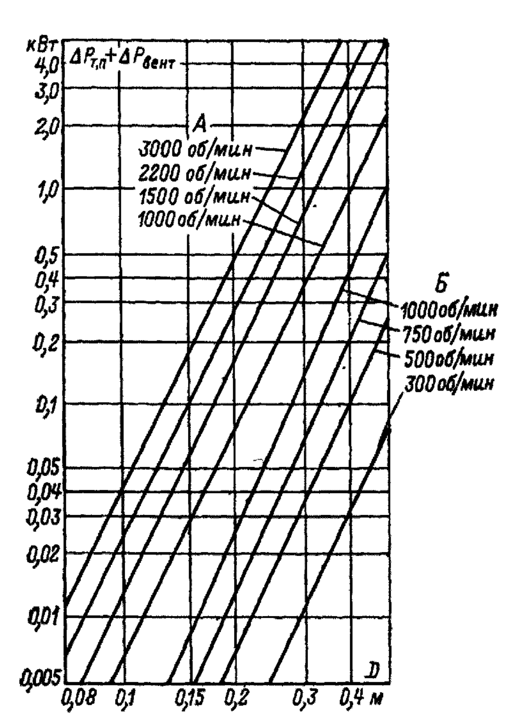


Рис.11.28. Потери на вентиляцию и трение в подшипниках

Рассчитывают суммарные потери $\sum P$. Для каждого значения тока определяют полезную мощность на валу P_2 и по (11.92) КПД.

Строят зависимости $P_2 = f(I), \eta = \varphi(I)$ и для номинального значения $P_{2ном}$ определяют номинальное значение тока якоря $I_{ном}$ и номинальный КПД $\eta_{ном}$.

Электромагнитная мощность при номинальном значении том якоря

$$P' = P_1 - P_{эа} - P_{э.с} - P_{э.Д} - P_{э.к} - P_{щ}. \quad (11.109)$$

Номинальное значение ЭДС, В,

$$E_{ном} = P' / I_{ном}. \quad (11.110)$$

Номинальное значение магнитного потока $\Phi_{\delta ном}$ и суммарную МДС $F_{\Sigma ном}$ определяют по характеристике холостого хода машины по переходной характеристике рассчитывают размагничивают действие реакции якоря F_{qd}.

Номинальная частота вращения, об/мин,

$$n_{ном} = \frac{60 E_{ном}}{(p/a) N \Phi_{\delta ном}}. \quad (11.111)$$

Номинальный ток обмотки параллельного возбуждения,

$$I_{в\,ном} = (F_{\Sigma} - F_c + F_{qd}) / w_в. \quad (11.112)$$

Вращающий момент на валу двигателя, Н·м,

$$M = 9{,}57 \cdot 10^3 P_2 / n. \quad (11.113)$$

Ток двигателя, А,

$$I_{1ном} = I_{ном} + I_{в.ном}. \quad (11.114)$$

Зависимости M, n, η, I от полезной мощности на валу определяют рабочие характеристики двигателя.

При расчете рабочих характеристик генераторов принимается частота вращения якоря n = const [6].

Напряжение на выводах генератора, В, определяется из основного уравнения напряжения

$$U = E - I(R_a + R_к + R_c + R_Д) - 2\Delta U_щ, \quad (11.115)$$

где E — ЭДС обмотки якоря; $R_a, R_к, R_c, R_Д$ — сопротивления, определяются по (11.25), (11.48), (11.60), (11.90) соответственно; $2\Delta U_щ$ — падение напряжения в щеточном контакте, принимается согласно приложению 4.

Однако E в (11.115) является сложной функцией тока якоря I, тока возбуждения $I_в$, и состояния магнитной цепи машины. Для определения ЭДС E необходимо задаться током

возбуждения $I_в$, током якоря I, рассчитать результирующую МДС:

$$F_\Sigma = F_в - F_{qd} \pm F_d + F_c. \qquad (11.116)$$

Далее по характеристике намагничивания определяется ЭДС E.

Если при указанных расчетах напряжение на выводах генератора U const, а рассчитывается зависимость тока возбуждения от тока нагрузки $I_в = f(I)$, то полученная характеристика называется регулировочной.

Если принимается полное сопротивление в цепи обмотки возбуждения $r_{в\Sigma}$ = const и определяется зависимость напряжения на выходах машины от тока нагрузки: $U = f(I)$, то полученная характеристика является внешней характеристикой генератора. В этом случае МДС в (11.116)

$$F_в = \frac{U}{r_{в\Sigma}} w_в,$$

$w_в$ — число витков обмотки возбуждения.

Путем расчета серии внешних характеристик для нескольких значений $r_{в\Sigma}$ можно построить нагрузочную характеристику, дающую зависимость напряжения U на выводах машины от тока возбуждения I, для принятого значения тока нагрузки.

11.11. ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО И ВЕНТИЛЯЦИОННОГО РАСЧЕТОВ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Тепловой и вентиляционный расчеты машин постоянного тока основываются на общих принципах расчета тепловых и вентиляционных схем электрических машин, изложенных в гл. 7.

Для приближенной оценки тепловой напряженности машины постоянного тока достаточно определить превышения температуры отдельных активных частей ее при выбранных электромагнитных нагрузках и геометрических размерах. В этом случае можно использовать приближенные методики тепловых и вентиляционных расчетов.

Обычно рассчитывают средние превышения температуры обмоток якоря, возбуждения, добавочных полюсов и компенсационной, а также поверхности коллектора.

Эти превышения температуры с учетом приближенного расчета должны быть ниже предельных допускаемых значений, установленных ГОСТ 183, не менее чем на 10 %.

При расчете средних превышений температуры активных частей машины сопротивления обмоток приводят к предельным допускаемым температурам для выбранного класса нагревостойкости изоляции. Для этого сопротивления, вычисленные при расчете рабочих характеристик, необходимо умножить на коэф-

фициент $k_т$. При классе нагревостойкости изоляции В $k_т$ = 1,15, при классе нагревостойкости F $k_т$ = 1,07, при классе нагревостойкости Н $k_т$ 1,145.

Вентиляционный расчет машин постоянного тока также выполняют с использованием средних аэродинамических сопротивлений и конструктивных размеров вентиляционных устройств серийных машин.

Для теплового и вентиляционного расчетов машины необходимо установить мощности тепловых потоков, площади отдельных поверхностей и коэффициенты теплоотдачи с этих поверхностей.

Потери мощности в обмотках с учетом поправочного коэффициента $k_т$, Вт, составляют:

$P_{aт} = k_т I_н^2 R_a$ — в обмотке якоря;

$P_{д.т} = k_т I_н^2 R_д$ — в обмотке добавочных полюсов;

$P_{к.т} = k_т I_н^2 R_к$ —в компенсационной обмотке;

$P_{с.т} = k_т I_н^2 R_с$ — в стабилизирующей обмотке;

$P_{в.т}$ $k_т I_{в.н}{}^2 R_в$ — в обмотке возбуждения.

Расчетные значения потерь в обмотках принимают при номинальных токах якоря и возбуждения.

Для расчета потерь, отводимых охлаждающим внутренние объемы машины воздухом и внешней поверхностью машины, принимают, что через внешнюю поверхность отводится часть потерь обмоток возбуждения, стабилизирующей, добавочных полюсов и компенсационной, равная:

при исполнении по степеням защиты 1Р22, 1Р44 и способам охлаждения IC01, IC17, IC37

$$P_{вн} = 0,1(P_{в.т} + P_{с.т} + P_{д.т} + P_{к.т}); \qquad (11.117)$$

при исполнениях 1Р44, IC0041

$$P_{вн} = 0,3(P_{в.т} + P_{с.т} + P_{д.т} + P_{к.т}); \qquad (11.118)$$

при исполнениях IP44, 10)141

$$P_{вн} = 0,4(P_{в.т} + P_{с.т} + P_{д.т} + P_{к.т}). \qquad (11.119)$$

Потери, отводимые охлаждающим воздухом из внутреннего объема машины, составляют:

$$\Sigma P' = P_1 \quad P_{нар}, \qquad (11.120)$$

где ΣP $P_1 - P_н$, а при исполнении по степени защиты IP44

$$\Sigma P = P_1 - P_{ном} - \Delta(P_{т.п} + P_{вент}).$$

Соответственно потери отводимые охлаждающим воздухом из внутреннего объема машины через поверхность i-й обмотки главных

и добавочных полюсов, в зависимости от исполнения машины и системы охлаждения согласно (11.117)—(11.118) составляют 0,9 P_i; 0,7 P_i; 0,6 P_i.

При расчете среднего превышения температуры компенсационной обмотки необходимо учесть и добавочные потери, возникающие в полюсных наконечниках главных полюсов вследствие зубчатости наконечников. Эти потери ориентировочно равны, Вт:

$$P_{ст,п} = k_\Delta \cdot \left[\left(k_{\delta к} - 1\right) \cdot B_\delta t_к\right]^2 \cdot \left(\frac{Zn}{10^4}\right)^{1,5} \frac{2pb_r l_r}{10^6} \qquad (11.121)$$

где k_Δ — коэффициент, зависящий от толщины листа стали главного полюса; k_Δ = 1,5 при толщине листа 0,5 мм, k_Δ = 2,8 при толщине листа 1 мм и k_Δ = 4 при толщине листа 1,5 мм; $k_{\delta к}$ — коэффициент воздушного зазора полюсного наконечника; $t_к$ — зубцовый шаг паза компенсационной обмотки; b_r, $l_г$ — ширина и длина полюсного наконечника главного полюса.

Расчетные поверхности охлаждения тепловыделяющих поверхностей якоря обмоток главных и добавочных полюсов зависят от выбранной системы охлаждения (радиальной или аксиальной) и формы и размеров охлаждающих каналов, образованных поверхностями охлаждения обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов.

При тепловом расчете принимают следующие формулы для расчета поверхностей охлаждения.

Поверхность охлаждения якоря, м^2;

при аксиальной вентиляции

$$S_a = (\pi D + n_к d_к)(l_a - 0,5\Sigma l_б), \qquad (11.122)$$

где $n_к$, $d_к$ — число и диаметр аксиальных вентиляционных каналов якоря; $\Sigma l_б$ — общая длина (по длине якоря) бандажа;

при радиальной вентиляции

$$S_a = \pi D(l_a - 0,5\Sigma l_б - n_p b_p), \qquad (11.123)$$

где n_p, b_p — число и ширина радиальных вентиляционных каналов.

Поверхность охлаждения пазовой части обмотки якоря и компенсационной обмотки, м^2,

$$S_п = \Pi Z l_б k_с \qquad (11.124)$$

где Π — периметр поперечного сечения паза: для овального полузакрытого паза $\Pi = \pi(r_1 + r_2) + 2h_1$ для прямоугольного открытого паза $\Pi = 2(n_p + b_p)$; $l_б k_с$ — длина магнитопровода якоря (главного полюса для компенсационной обмотки).

Поверхность охлаждения наружной поверхности лобовых частей обмотки якоря, м^2.

$$S_л = 2\pi D(l_{вып} + 0,3 l_{бл}), \qquad (11.125)$$

где $l_{выл}$ — длина вылета лобовой части обмотки якоря: $l_{выл}$ = 0,3τ при $2p = 2$ $l_{выл}$ % 0,4τ при $2p \geq 4$; $\Sigma l_{бл}$ — полная ширина бандажа лобовой части обмотки.

Поверхность изоляции лобовых частей обмотки якоря» м^2,

$$2S_{изл} = 2Z\Pi_{из.л} l_б k_c, \qquad (11.126)$$

где $Z\Pi_{из.л}$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части; для овального полузакрытого паза $\Pi_{из.л} = (1 + \pi/2)(r_1 + r_2) + h_1$; для прямоугольного открытого паза $\Pi_{из.л} = 2(b_П + h_п)$; $l_л$ — длина лобовой части обмотки якоря, м.

Поверхность охлаждения лобовой части компенсационной обмотки, м^2:

для стержневой обмотки

$$S_{кл} = 2pN_к l_{кл}(b_Д + h_Д); \qquad (11.127)$$

для катушечной (секционной) обмотки

$$S_{кл} = 2pZ_к l_{кл}(2b_{кп} + h_{к.п}/2). \qquad (11.128)$$

где $N_к$ — число стержней компенсационной обмотки на один полюс;

$b_{кд}$; $h_{к.д}$ — ширина и высота дуги компенсационной обмотки; $b_{кп}$, $h_{к.п}$ — ширина и высота паза компенсационной обмотки. Поверхность охлаждения обмотки возбуждения, м^2,

$$S_в = l_{в.ср}\Pi_в, \qquad (11.129)$$

где $l_{в.ср}$ — средняя длина витка обмотки возбуждения; $\Pi_в$ — периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения обмотки возбуждения. Для определения периметра Π по эскизу межполюсного окна определяют длины участков контура поперечного сечения обмотки; поверхности, прилегающие к сердечнику главного полюса, не учитываются; поверхности, обращенные к каналам шириной менее 6 мм, учитываются с коэффициентом 0,5; поверхности, прилегающие к изоляционным рамкам, учитываются с коэффициентом 0,3.

Поверхность охлаждения обмотки добавочных полюсов, м^2,

$$S_Д = l_{Д.ср}\Pi_Д, \qquad (11.130)$$

где расчет периметра $\Pi_Д$ — поперечного сечения условной поверхности охлаждения добавочного полюса — производят так же, как и для обмотки возбуждения.

Поверхность охлаждения коллектора, м^2,

$$S_{кол} = \pi D_к l_к. \qquad (11.131)$$

где $D_к$ и $l_к$ — диаметр и длина коллектора.

Расчетное значение внешней поверхности охлаждения двигателя, м^2,

$$S_{охл} = \pi D_{вн}(l_\delta + 2l_{выл}), \qquad (11.132)$$

где $D_{вн}$— внешний диаметр станины, м; $l_{выл}$ — вылет лобовых частей обмотки якоря, м.

Коэффициент теплоотдачи с поверхности твердого тела зависит от характера течения охлаждающей среды, омывающей поверхность, конфигурации и размеров поверхности, характера покрытия и т. д.

Средние значения коэффициентов теплоотдачи с расчетных поверхностей машин постоянного тока приведены на рис. 11.29...11.32.

Превышение температуры поверхности магнитопровода якоря над температурой воздуха внутри машины, ° С,

$$\Delta\vartheta_a = \frac{P_{aт}\left(\dfrac{2l_\delta}{l_{aср}}\right) + P_{ст}}{S_a \alpha_a} \quad (11.133)$$

где α_a — коэффициент теплоотдачи по рис. 11.29.

Превышение температуры внешней поверхности лобовых частей якоря, ^{0} С,

$$\Delta\vartheta_{пов.л} = \frac{P_{aт}\left(1 - \dfrac{2l_\delta}{l_{aср}}\right)}{2S_л \alpha_л} \quad (11.134)$$

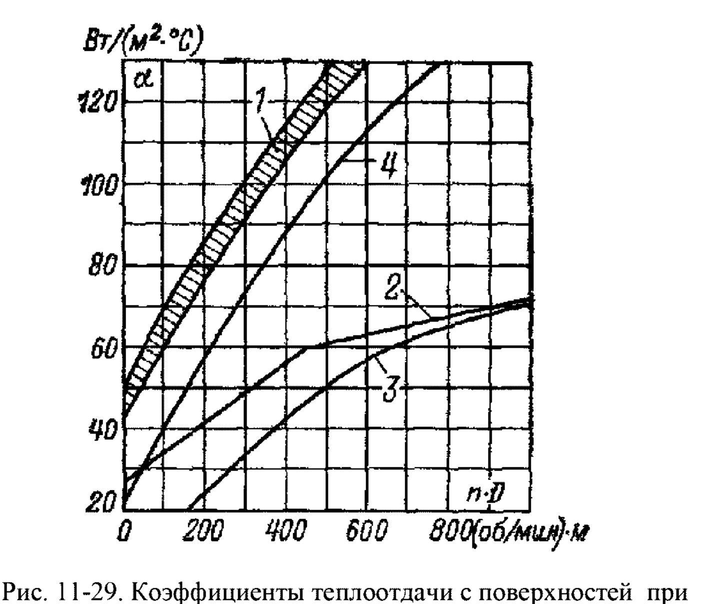


Рис. 11-29. Коэффициенты теплоотдачи с поверхностей при аксиальной вентиляции.

1 — якоря и лобовых частей обмоток якоря для исполнений IP22 и IP44; *2* — обмоток параллельного возбуждения и добавочных полюсов; *3* — дуг компенсационной обмотки; *4* — полюсного наконечника главного полюса, обращенного к воздушному зазору.

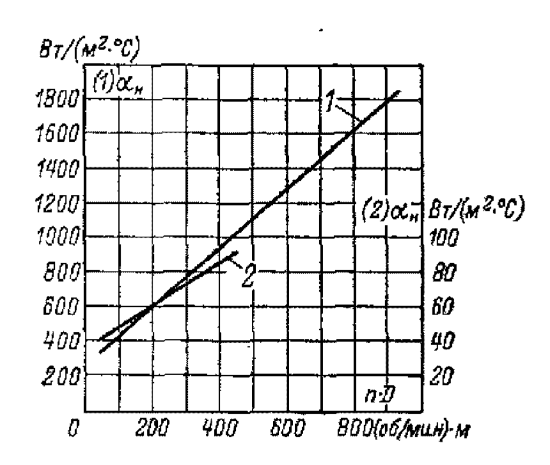


Рис 11.30. Минимальные значения коэффициента подогрева воздуха при исполнениях и способах охлаждения машины:

1 — IP22 (IC01, IC37), IP44, IC37 при $D_{вн}$ <0,6 м; 2 — IP44, IC0I41 при $D_{вн}$ <0,22 м

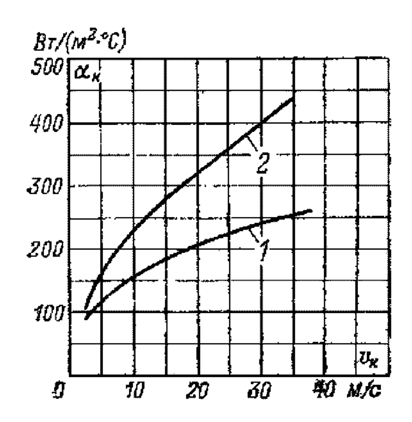


Рис. 11.31. Коэффициенты теплоотдачи с поверхности коллектора:
/ — без аксиальных каналов; 2 — с аксиальными каналами

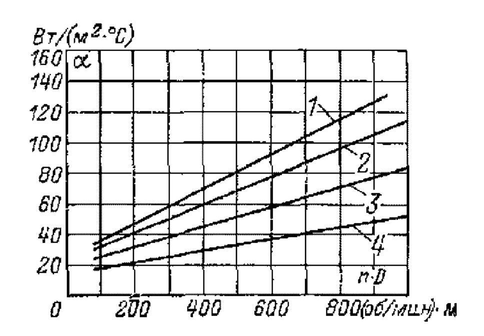


Рис. 11.32. Коэффициенты теплоотдачи с поверхностей при радиальной вентиляции:
1 — якоря и лобовых частей обмоток якоря, 2 — полюсного наконечника главного полюса в воздушный зазор, 3 — обмоток параллельного возбуждения и добавочных полюсов; 4 — дуг компенсационной обмотки

Перепад температуры в изоляции паза обмотки якоря для овальных полузакрытых пазов, ° С,

$$\Delta\vartheta_{из.п} = \frac{P_{aт}\left(\frac{2l_a}{l_{acp}}\right)}{S_п}\left(\frac{r_1 + r_2}{8\lambda'_{экв}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}\right), \tag{11.135}$$

где r_1 и r_2 — размеры паза; $\lambda'_{экв}$ — эквивалентная теплопроводность внутренней изоляции секции из круглого провода: $\lambda'_{экв} \approx 1{,}4$ Вт/(м^2 °С); — эквивалентная теплопроводность изоляции: для классов нагревостойкости B, F, H $\lambda_{экв} = 0{,}16$ Вт/(м^2 °С);

для открытых прямоугольных пазов составляющая $\left(\frac{r_1 + r_2}{8\lambda_{экв}}\right) = 0$.

Перепад температуры в изоляции лобовых частей обмотки якоря, °С,

$$\Delta\vartheta_{из.л} = \frac{P_{aт}\left(1 - \frac{2l_a}{l_{acp}}\right)}{S_{пл}}\left(\frac{h_п}{8\lambda'_{экв}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}\right), \tag{11.136}$$

где $h_п$ — высота паза; для якорей с жесткими секциями из прямоугольного провода: $\frac{h_п}{8\lambda_{экв}} \approx 0$; для якорей со всыпными обмотками без общей изоляции лобовых частей секции $\frac{\Delta b_{из}}{\lambda_{экв}} \approx 0$;

Среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_{воз} = \sum P' / (S_{охл} a_в), \tag{11.137}$$

где $\alpha_в$ — коэффициент подогрева воздуха (см. рис. 11.30).

Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_{a ср} = \left(\Delta\vartheta_{a} + \Delta\vartheta_{из.п}\right)\frac{2l_\delta}{l_{a ср}} + \left(\Delta\vartheta_{пов.л} + \Delta\vartheta_{из л}\right)\cdot\left(1 - \frac{2l_a}{l_{a ср}}\right) + \Delta\vartheta_{âîç}, \tag{11.138}$$

Превышение температуры наружной поверхности обмотки возбуждения, °С,

$$\Delta\vartheta_в = \frac{P_в}{2pS_в\alpha_{\grave{a}}}, \tag{11.139}$$

где $\alpha_в$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности обмотки возбуждения (см. рис. 11.29).

Расчет $P'_в$ в зависимости от исполнения машины и системы охлаждения приведен выше.

Перепад температуры в изоляции многослойной катушки обмотки возбуждения, °С,

$$\Delta\vartheta_{из.в} = \frac{P_в}{2pS_в}\left(\frac{b_в}{8\lambda_{экв}} + \frac{\Delta b_{из.в}}{\lambda_{экв}}\right), \tag{11.140}$$

где $b_в$ — средняя ширина катушки; $\lambda_{экв}$ и $\lambda_{экв}$ принимаются такими же, как и для изоляции обмотки якоря: $\lambda_{экв}$ = 1,4 Вт/(м$^2\cdot$°С), $\lambda_{экв}$ = 0,16 Вт/(м$^2\cdot$°С).

Для катушек возбуждения, выполненных из проводов прямоугольного сечения, составляющая $\frac{b_в}{8\lambda_{экв}} = 0$.

Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_{в.ср} = \Delta\vartheta_в + \Delta\vartheta_{из в} + \Delta\vartheta_{воз}. \tag{11.141}$$

Превышение температуры наружной поверхности обмотки добавочных полюсов над температурой воздуха внутри машины, ° С,

$$\Delta\vartheta_{из.в} = \frac{P_{д.т}}{2p_д S_д \alpha_д},$$

где $\alpha_д$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности добавочного полюса: $\alpha_д = \alpha_в$.

Перепад температуры в изоляции многослойной обмотки добавочного полюса, ° С,

$$\Delta\vartheta_{из.д} = \frac{P_{д т}}{2p_д S_д}\left(\frac{b_{кт д}}{8\lambda_{экв}} + \frac{\Delta b_{из д}}{\lambda_{экв}}\right), \tag{11.142}$$

где $b_{кт.д}$ — ширина обмотки добавочного полюса; $\lambda_{экв}$ и $\lambda_{экв}$ принимаются такими же, как и для изоляции обмотки якоря с полузакрытыми пазами; $\Delta b_{из.д}$ = 0 для обмоток из прямоугольного провода.

Среднее превышение температуры обмотки добавочных полюсов над температурой охлаждающей среды, °С,

$$\Delta\vartheta_{д.ср} = \Delta\vartheta_{д} + \Delta\vartheta_{из.д} + \Delta\vartheta_{воз}\ . \tag{11.143}$$

Превышение температуры поверхности полюсного наконечника главного полюса,°С

$$\Delta\vartheta_{из\,д} = \frac{P_{д.т}\cdot\left(\frac{2l_{г}}{l_{к.ср}}\right)+P_{ст\,п}}{2pb_{г}l_{г}\alpha_{г\,п}} \tag{11.144}$$

где $\alpha_{г\,п}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности главного полюса (см. рис. 11.29); $b_{г}$, $l_{г}$ — ширина и длина полюсного наконечника главного полюса, м.

Перепад температуры в пазовой изоляции компенсационной обмотки, °С,

$$\Delta\vartheta_{из.к} = \frac{P_{к.т}\cdot\left(\frac{2l_{г}}{l_{к.ср}}\right)\Delta b_{из.к}}{2pZ_{к}2(b_{кп}+h_{кп})l_{г}\lambda_{экв}} \tag{11.145}$$

где $\Delta b_{из.к}$ — толщина пазовой изоляции компенсационной обмотки (см. табл. 11.13); $b_{кп}$, $h_{кп}$ — ширина и высота паза компенсационной обмотки.

Превышение температуры лобовой части компенсационной обмотки над температурой воздуха внутри машины, °С,

$$\Delta\vartheta_{к\,л} = \frac{P_{к.т}\cdot\left(1-\frac{2l_{г}}{l_{к\,ср}}\right)\Delta b_{из.к}}{S_{к\,л}\alpha_{д\,к}}, \tag{11.146}$$

где $\alpha_{дк}$ — коэффициент теплоотдачи дуг компенсационной обмотки (см. рис. 11.29).

Среднее превышение температуры компенсационной обмотки над температурой охлаждающего воздуха, °С,

$$\Delta\vartheta_{к\,ср} = (\Delta\vartheta_{к\,п}+\Delta\vartheta_{из.к})\frac{2l_{к}}{l_{к\,ср}} + \Delta\vartheta_{к\,л}\left(1-\frac{2l_{г}}{l_{к\,ср}}\right)+\Delta\vartheta_{воз}, \tag{11.147}$$

Превышение температуры поверхности коллектора над температурой воздуха внутри машины, ° С,

$$\Delta\vartheta_{к} = \frac{\Delta(P_{щ}+P_{т\,щ})}{S_{к}\alpha_{к}}, \tag{11.148}$$

где $\alpha_{к}$ — коэффициент теплоотдачи с поверхности коллектора (по рис. 11.31); потери в щеточном контакте определены при расчете рабочих характеристик машины.

Среднее превышение температуры коллектора над температурой охлаждающей среды, °С:

при входе охлаждающего воздуха со стороны, противоположной коллектору,

$$\Delta\vartheta_{к.ср} = \Delta\vartheta_{к} + 2\Delta\vartheta_{воз} \qquad (11.149)$$

при входе охлаждающего воздуха со стороны коллектора

$$\Delta\vartheta_{к.ср} = \Delta\vartheta_{к} + \Delta\vartheta_{воз} \qquad (11.150)$$

Расход воздуха, необходимый для охлаждения машины, м^3/с,

$$Q_{в} = \frac{\Sigma P}{1100 \cdot 2\Delta\vartheta_{воз}} \qquad (11.151)$$

где ΣP определяется согласно (11.120); $\Delta\vartheta_{воз}$ — среднее превышение температуры воздуха внутри машины; при вентиляционном расчете принимается, что превышение температуры выходящего из машины воздуха над входящим в 2 раза больше среднего превышения температуры $\Delta\vartheta_{воз}$, т. е. $\vartheta_{вых} - \vartheta_{вх} = 2\Delta\vartheta_{воз}$.

Давление вентилятора, Па, необходимое для обеспечения заданного расхода воздуха $Q_{воз}$,

$$H \quad ZQ^2_{воз} \qquad (11.152)$$

где Z — эквивалентное аэродинамическое сопротивление вентиляционного тракта машины; средние значения Z приведены на рис. 7.5.

Аэродинамическая характеристика вентиляционной системы машины с вентиляторами центробежного типа описывается квадратичной параболой:

$$H \quad H_0[1-(Q_{воз}/Q_{0воз})^2] \qquad (11.153)$$

где H_o — давление, создаваемое вентилятором в режиме холостого хода ($Q_{воз}$ = 0); $Q_{0воз}$ — расход вентилятора в режиме короткого замыкания (при работе вентилятора в атмосфере $H = 0$).

При аксиальной системе вентиляции наружный диаметр центробежного вентилятора, м,

$$D_2 \approx 0{,}9d_{с}, \qquad (11.154)$$

где $d_{с}$ — внутренний диаметр станины, м.

Внутренний диаметр колеса вентилятора, м,

$$D_1 = (1{,}25...1{,}3)D \qquad (11.155)$$

где D — диаметр якоря.

Ширина лопаток вентилятора

$$B_{л.в} \quad (0{,}12...0{,}15)D_2. \qquad (11.156)$$

Число лопаток вентилятора выбирается согласно формуле (7.56).

Давление в режиме холостого хода, Па,

$$H_0 = \eta_{a0}\rho(v_2^2 - v_1^2), \quad (11.157)$$

где $\eta_{a0} \approx 0,6$ — КПД вентилятора в режиме холостого хода;

$$v_2 = (\pi D_2 n)/60; \quad v_1 = (\pi D_1 n)/60.$$

Расход воздуха в режиме короткого замыкания $Q_{в.max}$, м^3/с,

$$Q_{в.max} = 0,42 v_2 S_2, \quad (11.158)$$

где $S_2 = 0,92 \pi D_2 b_{л.в}$.

Действительный расход воздуха $Q_{воз}$ при известных значениях H_0, H, $Q_{в.max}$ определяется согласно (11.152) и (11.153), м^3:

$$Q_{воз} = Q_{в.max}\sqrt{H_O/(H_O + ZQ^2_{в\,max})} \quad (П.159)$$

Действительный расход воздуха, рассчитанный по (11.159), должен быть равен необходимому расходу (11.151). Если это равенство не обеспечивается, то путем изменения ширины вентилятора $b_{л.в}$ и диаметров D_2 и D_1 необходимо обеспечить требуемый расход воздуха.

Мощность, потребляемая вентилятором, Вт,

$$P_{вен} = HQ_{воз}/\eta_э, \quad (11.160)$$

где = 0,18...0,2 — энергетический КПД вентилятора.

При радиальной системе вентиляции, выполняемой в основном в тихоходных машинах большой мощности (тысячи киловатт), вентиляционный расчет проводят по полной схеме аэродинамических потоков, охлаждающих машину. Методика указанных расчетов изложена в гл. 7. Коэффициенты теплоотдачи с поверхностей активных частей машины при радиальной системе вентиляции приведены на рис. 11.32.

Пример расчета двигателя постоянного тока

Задание на проект и исходные данные

Рассчитать двигатель постоянного тока со следующими данными:
мощность $P_{ном}$ - 11 кВт;
номинальное напряжение сети $U_{ном}$ = 220 В,
номинальная частота вращения $n_{ном}$ - 1500 об/мин,
высота оси вращения A = 160·10^1 м;
возбуждение параллельное без стабилизирующей обмотки;
исполнение по степени защиты 1Р22, по способу охлаждения — самовентиляция ПС01);
режим работы — продолжительный;
изоляция класса нагревостойкости В.

Конструкция двигателя должна соответствовать требованиям ГОСТ на установочные размеры и размеры выступающего конца вала, а также общим техническим требованиям на

машины электрические (ГОСТ 183). За основу конструкции принимается машина постоянного тока серии 2П.

Выбор главных размеров

1. Предварительное значение КПД двигателя выбираем по рис. 11.7: η = 84 %.
2. Ток двигателя (предварительное значение)

$I_{1ном} = P_{ном} \cdot 10^3 / \eta U_{ном} = 11 \cdot 10^3 / (0{,}84\ 220) = 59{,}5$ А.

3. Ток якоря

$I_{ном} = (1 - k_В) I_{1ном} = 0{,}965 \cdot 59{,}5 = 57{,}4$ А,

где $к_В = 0{,}035$ по табл. 11.8.

4. Электромагнитная мощность по (11.2а)

$$P' = P_{ном} \cdot \frac{100 + \eta}{2\eta} = 11000 \cdot \frac{100 + 84}{2 \cdot 84} = 12{,}048 \text{ Вт.}$$

5. Диаметр якоря согласно § 11.3 $D = 0{,}156$ м.
6. Выбираем линейную нагрузку якоря по рис. 11.9

$A = 2 \cdot 10^4$ А/м.

7. Индукция в воздушном зазоре по рис. 11.10 $B_\delta = 0{,}68$ Тл.

Расчетный коэффициент полюсной дуги по рис. 11.8 $\alpha_\delta = 0{,}62$.

8. Расчетная длина якоря

$$l_\delta = \frac{6{,}1 \cdot P'}{\alpha_\delta \cdot A \cdot B_\delta \cdot D^2 n_{ном}} = \frac{6{,}1 \cdot 12048}{0{,}62 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 0{,}68 \cdot (0{,}106)^2 \cdot 1500} = 0{,}237 \text{ м.}$$

9. Отношение длины магнитопровода якоря к его диаметру

$$\lambda = \frac{l_\delta}{D}\ 0{,}237/0{,}156 = 1{,}52.$$

10. Число полюсов принимаем 2р = 4.
11. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \pi \cdot 0{,}156/4 = 0{,}122 \text{ м.}$$

12. Расчетная ширина полюсного наконечника

$b_\delta = \alpha_\delta \cdot \tau = 0{,}62 \cdot 0{,}122 = 76 \cdot 10^{-3}$ м.

13. Действительная ширина полюсного наконечника при эксцентричном зазоре равна расчетной ширине:

$b_p = b_\delta = 76 \cdot 10^{-3}$ м.

Выбор обмотки якоря

14. Ток параллельной ветви

$$I_a = \frac{I_н}{2a} = 57{,}4/2 = 28{,}7 \text{ А.}$$

15. Выбираем простую волновую обмотку с числом параллельных ветвей $2a = 2$.
16. Предварительное общее число эффективных проводников по (11.4)

$$N = \frac{\pi D A}{I_a} = \frac{\pi \cdot 0{,}156 \cdot 20 \cdot 10^4}{28{,}7} = 342\ 17$$

17. Крайние пределы чисел пазов якоря с использованием (11.5)

$$Z_{min} = \frac{\pi D}{t_{z1\max}} = \frac{\pi \cdot 0{,}156}{2 \cdot 10^{\ 2}} = 24$$

$$Z_{max} = \frac{\pi D}{t_{z1\min}} = \frac{\pi \cdot 0{,}156}{10^{\ 2}} = 49$$

Принимаем Z = 29; $t_{Z1} = nD/Z = 16{,}9 \cdot 10^{-2}$ м.

18. Число эффективных проводников в пазу

$N_п = N / Z = 342/29 = 11{,}79 = 12.$

Принимаем целое четное число $N_П = 12$, тогда

$N = N_П\ Z = 12\ 29 = 348.$

19. Выбираем паз полузакрытый овальной формы с параллельными сторонами зубца.

20. Число коллекторных пластин K для различных значений $u_П = K/Z$ выбираем, сравнивая три варианта:

№ варианта	$u_П$	$K = U_п Z$	$W_с = \frac{N}{2K}$	$U_{к.ср}$, В
1	1	29	6	30,4
2	2	58	3	15,2
3	3	87	2	10,1

Поскольку напряжение между двумя соседними коллекторными пластинами $U_{к.ср} \le 2pU/K$ должно быть в пределах, не превышающих 15...16 В, принимаем вариант 3; в этом случае обмотка имеет целое число витков в секции $w_с = 2$, число коллекторных пластин K = 87, число эффективных проводников в пазу $N_П$ = 12, число секций в обмотке якоря $N_с = N(2\,w_с)$ = 348/4 = 87.

21. Уточняем линейную нагрузку:

$$A = \frac{N \cdot I_a}{\pi \cdot D} = \frac{348 \cdot 28{,}7}{3{,}14 \cdot 0{,}156} = 20379 \text{ А/м.}$$

22. Корректируем длину якоря:

$$l_\delta = 0{,}237 \cdot \frac{20000}{20379} = 0{,}232 \text{ м.}$$

23. Наружный диаметр коллектора при полузакрытых пазах (11.7)

$D_k = 0{,}65 \ldots 0{,}8\,D = (0{,}65 \ldots 0{,}80)\ 156 \cdot 10^{-3} = (94 \ldots\ 125) \cdot 10^{-3}$ м.

По таблице предпочтительного ряда чисел (см. § 11.4) принимаем диаметр коллектора $D_К = 125 \cdot 10^{-3}$ м

24. Окружная скорость коллектора

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}125 \cdot 1500}{60} = 9{,}8 \text{ м/с}$$

25. Коллекторное деление

$U = \pi D_К / K = \pi \cdot 0{,}125/87 = 4{,}5 \cdot 10^{-3}$ м.

26. Полный ток паза

$$I_n = \frac{\pi D A}{Z} = \frac{\pi \cdot 0{,}156 \cdot 20379}{29} = 344 \text{ А}$$

27. Предварительное значение плотности тока в обмотке якоря

$J_a = AJ / A = 1{,}6 \cdot 10^{11} / 20379 = 7{,}85 \cdot 10^{6}$ А/м2,

где AJ — предварительно выбираем по рис. 11.11.

28. Предварительное сечение эффективного проводника по (11.9)
$q = I_a / J_a = 28{,}7/(7{,}85 \cdot 10^4) = 3{,}7 \cdot 10^{-6}$ м².

Принимаем всыпную обмотку с круглыми проводниками и числом проводников, равным двум: марка провода ПЭТВ (см. табл. П3.1), диаметр неизолированного провода $d_Г = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр изолированного провода $d_{из}$, $= 1{,}685 \cdot 10^{-3}$ м, сечение провода $2{,}011 \cdot 10^{-6}$ м², сечение эффективного проводника обмотки якоря $q = n_{эл} \cdot q_{эл} = 2 \cdot 2{,}011 \cdot 10^{-6} = 4{,}022 \cdot 10^{-6}$ м²

Расчет геометрии зубцовой зоны

29. Сечение полузакрытого паза (за вычетом сечения пазовой изоляции и пазового клина) при предварительно принятом коэффициенте заполнения паза $к_з = 0{,}68 \ldots 0{,}72$ по (11.21)

$$S_o = \frac{N_п n_{эл} d_{из}^2}{k_з} = \frac{12 \cdot 2 \cdot (1{,}685 \cdot 10^{-3})^2}{0{,}72} = 94{,}6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

30. Высота паза (предварительно по рис 11.12)
$h_П = 22$ мм,
высота шлица паза $h_Ш = 0{,}8 \cdot 10^{-3}$ м, ширина шлица $b_Ш = 3 \cdot 10^{-3}$ м.
31. Ширина зубца по (11.11)

$$b_z = \frac{B_\delta \cdot t z_1}{B_z \cdot kc} = \frac{0{,}552 \cdot 11{,}483 \cdot 10^{-3}}{1{,}75 \cdot 0{,}95} = 6{,}2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

где $b_Z = 1{,}95$ Тл — допустимое значение индукции в стали зубца по табл. 11.9 при частоте перемагничивания стали зубцов
$f = pn/60 = 2 \cdot 1500/60 = 50$ Гц;

$k_c = 0{,}95$ — коэффициент заполнения магнитопровода якоря сталью по табл 2.1.
32. Больший радиус по (11.14)

$$r_1 = \frac{\pi(D - 2h_ш) - Zb_Z}{2(\pi + Z)} = \frac{3{,}14(0{,}156 - 2 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3}) - 29 \cdot 6{,}2 \cdot 10^{-3}}{2(3{,}14 + 29)} = 4{,}75 \cdot 10^{-3} \text{м}.$$

Принимаем $r_1 = 4{,}75 \cdot 10^{-3}$ м.
33. Меньший радиус по (11.15)

$$r_2 = \frac{\pi(D - 2h_п) - Zb_z}{2(Z - \pi)} = \frac{\pi(0{,}156 - 2 \cdot 22 \cdot 10^{-3}) - 29 \cdot 6{,}2 \cdot 10^{-3}}{2(29 - 3{,}14)} = 3{,}3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

34. Расстояние между центрами радиусов по (П. 16)
$h_1 = h_п - h_ш - r_1 - r_2 = 22 \cdot 10^{-3} - 0{,}8 \cdot 10^{-3} - 4{,}75 \cdot 10^{-3} - 3{,}3 \cdot 10^{-3} = 13 \cdot 10^{-3}$ м.
35. Минимальное сечение зубцов якоря по табл. 11.16

$$S_z = \frac{Z}{2p} \cdot \alpha_\delta \cdot bz \cdot l_\delta \cdot kc = S_z = \frac{29}{4} \cdot 0{,}62 \cdot 6{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 232 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}95 = 61{,}4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

36. Предварительное значение ЭДС
$E_{НОМ} = U_{ном} \cdot k_д = 220 \cdot 0.9 = 198$ В,

где $k_Д = 0{,}9$ по табл.11.8.
37. Предварительное значение магнитного потока на полюс

$$\Phi_{\delta ном} = \frac{60 E_{ном} a}{pNn_{ном}} = \frac{60 \cdot 198}{2 \cdot 348 \cdot 1500} = 1{,}14 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$$

38. Для магнитопровода якоря принимаем сталь марки 2312. Индукция в сечении зубцов

$$B_z = \frac{\Phi_{\delta ном}}{S_Z} = \frac{1{,}14 \cdot 10^{-2}}{61{,}4 \cdot 10^{-4}} = 1{,}856 \text{ Тл}.$$

Расчет обмотки якоря

39.Длина лобовой части витка

$$l_л = (1{,}2...1{,}35)\tau = 1{,}35 \cdot 122 \cdot 10^{-3} = 165 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

40.Средняя длина витка обмотки якоря по (11.22)

$$l_{a\,ср} \;=\; 2\,(\,l_п \;+\; l_ё\,) \;= 2(0{,}232 + 0{,}165) = 0{,}794 \text{ м.}$$

41.Полная длина обмотки якоря

$$L_{Мa} = \frac{N}{2} l_{aср} = \frac{348}{2} \cdot 0{,}794 = 138{,}1 \text{ м.}$$

42.Сопротивление обмотки якоря при ϑ = 20° С

$$R_a = \frac{L_{Мa}}{57 \cdot 10^6 \cdot q_a (2a)^2} = \frac{138{,}1}{57 \cdot 10^6 \cdot 4{,}022 \cdot 10^{-6} \cdot 4} = 0{,}156 \text{ Ом.}$$

43.Сопротивление обмотки якоря при ϑ = 75° С (см. гл. 5)

$$R_{aн} = 1{,}22 \cdot R_a = 1{,}22 * 0{,}156 = 0{,}19 \text{ Ом.}$$

44.Масса меди обмотки якоря по (11.26)

$$m_{Мa} = 8900 l_{Мa} q_a = 8900 \cdot 138{,}1 \cdot 4{,}022 \cdot 10^{-6} = 4{,}94 \text{ кг.}$$

45.Расчет шагов обмотки:

а) шаг по коллектору и результирующий шаг

$y_К = y = (K \pm 1)/p = (87 - 1)/2 = 43$;

б) первый частичный шаг

$y_1 = K/(2p) \pm \varepsilon = 87/4 \pm 3/4 = 21$;

в) второй частичный шаг

$y_2 = y - y_1 = 43 - 21 = 22$.

Определение размеров магнитной цепи

46.Предварительное значение внутреннего диаметра якоря и диаметра вала

$$D_o = 27 \cdot \sqrt[3]{P_{ном} / n_{ном}} = 27 \cdot \sqrt[3]{11/1500} = 52 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

где $P_{ном}$ = 11 кВт; $n_{ном}$ = 1500 об/мин.

По табл. 11.11 принимаем $D_о = 55 \cdot 10^{-3}$ м.

47.Высота спинки якоря (см. рис. 11.13)

$$h_j = \frac{D - D_0}{2} - h_п = \frac{156 \cdot 10^{\;3} - 55 \cdot 10^{\;3}}{2} - 22 \cdot 10^{\;3} = 28{,}5 \cdot 10^{\;3} \text{ м.}$$

48.Принимаем для сердечников главных полюсов сталь марки 3411 толщиной 0,5 мм, коэффициент рассеяния $\sigma_г = 1{,}15$, длину сердечника $l_г = l_\delta = 0{,}232$ м, коэффициент заполнения сталью по табл. 2.1 $k_c = 0{,}95$, ширину выступа полюсного наконечника $b_{г.в} = 0{,}1 b_p = 0{,}1 \cdot 76 \cdot 10^{-3} = 8 \cdot 10^{-3}$ м.

49 Ширина сердечника главного полюса (см. рис. 11.18)

$$b_г = b_p - 2b_{г.в} = 76 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 8 \cdot 10^{-3} = 60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

50 Индукция в сердечнике по (табл. 11.17)

$$B_Г = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta ном}}{k_c \cdot b_г \cdot l_г} = \frac{1{,}15 \cdot 1{,}14 \cdot 10^{-2}}{0{,}95 \cdot 60 \cdot 10^{-3} \cdot 232 \cdot 10^{-3}} = 0{,}99 \text{ Тл}$$

51.Сечение станины

$$S_C = \frac{\sigma_{г}\Phi_{\delta ном}}{2B_{с}} = \frac{1{,}15\cdot 1{,}14\cdot 10^{-2}}{2\cdot 1{,}3} = 50{,}4\cdot 10^{-4}\ м^2$$

где $B_с$ = 1,3 Тл (см. § 11.6).

52.Длина станины по (11.52)

$l_с = l_г + 0{,}4\,D = 0{,}232 + 0{,}4\cdot 0{,}156 = 294\cdot 10^{-3}$ м.

53.Высота станины (см. табл. 11.17)

$h_с = S_с\ H_с = (50{,}4\ 10^{-4})/(294\cdot 10^{-3}) = 17\cdot 10^{-3}$м.

54.Внешний диаметр станины

$D_{вн} = 2h - (8...10)\ 10^{-3} = 2\cdot 160\cdot 10^{-3} - (8...10)\ \cdot 10^{-3} = 310\cdot 10^{-3}$ м.

55.Внутренний диаметр станины

$d_с = D_{вн} - 2h_с = 310\cdot 10^{-3} - 2\ \cdot 17\cdot 10^{-3} = 276\cdot 10^{-3}$ м.

56.Высота главного полюса (см. рис. 11.23)

$$h_{Г} = \frac{d_c - D - 2\delta}{2} = \frac{276\cdot 10^{\ 3} - 156\cdot 10^{\ 3}\,ì\ - 2\cdot 1{,}5\cdot 10^{\ 3}}{2} = 58{,}5\cdot 10^{\ 3}\,м$$

где $\delta = 1{,}5\cdot 10^{-3}$ м — воздушный зазор согласно рис. 11.17.

Расчетные сечения магнитной цепи

57.Сечение воздушного зазора (см. табл. 11.17)

$S_\delta = b_p l_\delta = 76\cdot 10^{-3}\ 232\cdot 10^{-3} = 176{,}32\cdot 10^{-4}\ м^2$.

58.Длина стали якоря

$l_{ст} = l_\delta\ k_{ст} = 232\cdot 10^{-3}\ \cdot 0{,}95 = 0{,}220$ м.

59.Минимальное сечение зубцов якоря (см. табл. 11.16)

$S_z = 61{,}4\cdot 10^{-4}\ м^2$.

60.Сечение спинки якоря (см. табл. 11.16)

$S_j = l_{ст}\ hj = 220{,}410^{-3}\cdot 28{,}5\cdot 10^{-3} = 62{,}8\cdot 10^{-4}\ м^2$.

61.Сечение сердечника главного полюса (см. табл. 11.16)

$S_г = k_{ст}\ l_г b_г = 0{,}95\ \cdot 232\ \cdot 10^{-3} - 60\cdot 10^{-3} = 132{,}2\cdot 10^{-4}\ м^2$.

62.Сечение станины (см. п. 51)

$S_с = 50{,}4\ \cdot 10^{-4}\ м^2$.

Средние длины магнитных линий

63.Воздушный зазор (см. рис. 11.17)

$\delta = 1{,}5\cdot 10^{-3}$ м.

64.Коэффициент воздушного зазора, учитывающий наличие пазов на якоре, по (11.50)

$$k_{\delta a} = \frac{t_{Z1} + 10\delta}{t_{Z1} - b_{щ}\ \cdot 10\delta} = \frac{16{,}9\cdot 10^{-3} + 10\cdot 1{,}5\cdot 10^{-3}}{16{,}9\cdot 10^{-3} - 3\cdot 10^{-3} + 10\cdot 1{,}5\cdot 10^{-3}} = 1{,}1$$

65.Расчетная длина воздушного зазора

$L_\delta = k_{\delta a}\cdot\delta = 1{,}1\cdot 1{,}5\ \cdot 10^{-3}\ = 1{,}65\cdot 10^{-3}$ м.

66. Длина магнитной линии в зубцах якоря (см. табл. 11.16)

$Lz = h_п - 0{,}2r_1 = 22 \cdot 10^{-3} - 0{,}2 \cdot 4{,}75 \cdot 10^{-3} = 21 \cdot 10^{-3}$ м.

67. Длина магнитной линии в спинке якоря (см. табл. 11.16)

$$Lj = \frac{\pi(D_o + hj)}{4p} + \frac{hj}{2} = \frac{\pi(55 \cdot 10^{-3} + 28{,}5 \cdot 10^{-3})}{8} + \frac{28{,}5 \cdot 10^{-3}}{2} = 47 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

68.Длина магнитной линии в сердечнике главного полюса

$L_r = h_r = 58{,}5 \cdot 10^{-3}$ м.

69. Воздушный зазор между главным полюсом и станиной

$L_{с.п} = 2l_r \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} = 0{,}15 \cdot 10^{--3}$ м

70. Длина магнитной линии в станине (табл. 11.16)

$$L_с = \frac{\pi(D_{ВН} - h_с)}{4p} + \frac{h_с}{2} = \frac{\pi(310 \cdot 10^{\ 3} - 17 \cdot 10^{\ 3})}{4 \cdot 2} + \frac{17 \cdot 10^{\ 3}}{2} = 123{,}5 \cdot 10^{--3} \text{ м.}$$

Индукция в расчетных сечениях магнитной цени

71. Индукция в воздушном зазоре (см. табл. 11.17)

$$B_{\delta ном} = \frac{\Phi_{\delta ном}}{S_\delta} = \frac{1{,}14 \cdot 10^{-2}}{176.32 \cdot 10^{-4}\ м^2} = 0{,}646 \text{Тл}$$

72. Индукция в сечении зубцов якоря (табл. 11.16)

$$B_z = \frac{\Phi_{\delta ном}}{S_z} = \frac{1{,}14 \cdot 10^{-2}}{61{,}4 \cdot 10^{-4}} = 1{,}85 \text{ Тл.}$$

73.Индукция в спинке якоря (табл. 11.16)

$$B_j = \frac{\Phi_{\delta ном}}{2S_j} = \frac{1{,}14 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 62{,}8 \cdot 10^{-4}} = 0{,}9 \text{ Тл.}$$

74.Индукция в сердечнике главного полюса (см. табл. 11.16)

$$B_г = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta ном}}{S_г} = \frac{1{,}15 \cdot 1{,}14 \cdot 10^{-2}}{132{,}2 \cdot 10^{-4}} = 0{,}99 \text{ Тл}$$

Для стали 3411 допустимое значение $B_г \leq 1{,}5$ Тл.

75. Индукция в станине (см. табл. 11.16)

$$B_с = \frac{\sigma_г \Phi_{\delta ном}}{2S_с} = \frac{1{,}15 \cdot 1{,}14 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 8{,}283 \cdot 10^{-3}} = 1{,}3 \text{ Тл}$$

76. Индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной

$B_{сп} = B_г = 0{,}999$ Тл.

Магнитные напряжения

77.Магнитное напряжение воздушного зазора

$F_\delta = 0{,}8 B_\delta L_\delta \cdot 10^6 = 0{,}8 \cdot 0{,}646 \cdot 1{,}65 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 = 852{,}7$ А.

78. Коэффициент вытеснения потока

$$k_z = \frac{t_{z1} \cdot l_\delta}{b_z \cdot l_{cm}} = \frac{16{,}9 \cdot 10^{-3} \cdot 232 \cdot 10^{-3}}{6{,}2 \cdot 10^{-3} \cdot 220{,}4 \cdot 10^{-3}} = 2{,}87$$

79 Магнитное напряжение зубцов якоря

$Fz = HzLz = 16{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} = 344{,}4$ А.

H_z = 16,4·10^3 А/м определяется по приложению 1 для стали марки 2312 при индукции а зубце согласно п. 72 B_z = 1,85 Тл.

80. Магнитное напряжение ярма якоря

$F_j = H_jL_j$=1,9 10^3·47·10^{-3} = 8,9 А,

где H_j = 1,9 10^2 А/м по приложению 1.

81. Магнитное напряжение сердечника главного полюса (сталь марки 3411)

$F_j = H_ГL_Г$ = 1,7 · 10^2 ·58,5 10^{-3} = 9,9 А,

где $H_Г$ = 1,7 · 10^2 А/м по приложению 1.

82. Магнитное напряжение воздушного зазора между главным полюсом и станиной

$F_{с.п} = 0{,}8B_Г\ L_{с.п} \cdot 10^4 = 0{,}8 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}15 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4 = 119$ А.

83.Магнитное напряжение станины (массивная сталь марки Ст3)

$F_с = H_сL_с$ = 15,90 ·10^2 ·123,5· 10^{-3} = 196 А,

где $H_с$ = 15,90 · 10^2 А/м по приложению 1.

84.Суммарная МДС на полюс

$F_\Sigma = F_\delta + F_z + F_j + F_Г + F_{с.п} + F_с$ = 852,7 + 344,4 + 8,9 + 9,9 + 119 + 196 = 1530 А.

Расчет характеристик намагничивания машин приведен в табл. 11.20.

85.МДС переходной характеристики

$F_{\delta zj} = F_\delta + F_z + F_j$ = 852,7 + 344,4 + 8,9 = 1206 А

Расчет параллельной обмотки возбуждения

86.Размагничивающее действие реакции якоря определяют по переходной характеристике (рис. 11.33) согласно § 11.5 F_{qd} = 220 А.

87.Необходимая МДС параллельной обмотки

$F_в = F_\Sigma + F_{qd}$ = 1530 + 220 = 1750 А.

88.Принимаем предварительно ширину катушки обмотки параллельного возбуждения $b_{кт.в}$ = 25·10^{-3} м, тогда средняя длина витка обмотки по (11.57)

$l_{ср.в} = 2(l_Г + l_Г) + \pi\ (b_{кт.в} 2\Delta_{из})$ =

= 2(232 ·10^{-3} + 60·10^{-3}) +π (25 ·10^{-3} + 2 ·0,5 ·10^{-3}) = 665,7 10^{-3} м,

где $\Delta_{из}$ = 0,5 • 10^{-3} м — односторонний зазор между катушкой и полюсом.

89.Сечение меди параллельной обмотки по (11.58)

$$q_в = \frac{\rho_\vartheta \cdot k_з \cdot 2p \cdot F_B \cdot l_{пд.в} \cdot a}{U_в} =$$

$$= \frac{1{,}1 \cdot 1{,}22 \cdot 4 \cdot 1750 \cdot 665{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{57 \cdot 10^6 \cdot 220} = 0{,}53\ мм^2,$$

где а - число параллельных ветвей обмотки параллельного возбуждения, принимаем - 1; $k_з$ = 1,1...1,2 — коэффициент запаса, ρ_ϑ для меди —1/5710^6.

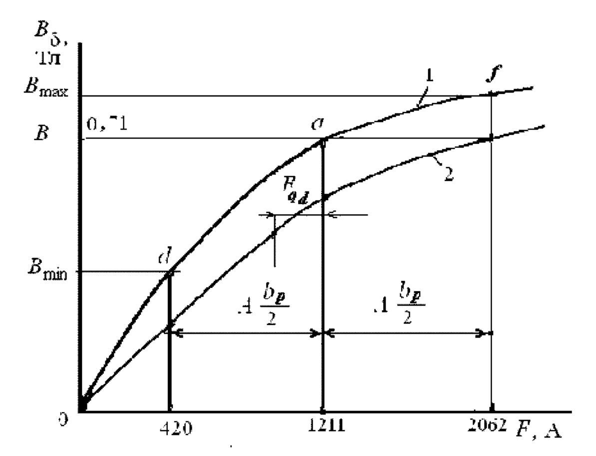


Рис. 11.33. Переходная характеристика (1) и характеристика холостого хода (2)

Принимаем по табл. 11.18 круглый провод ПЭТВ, по табл. П3.1 диаметр неизолированного провода $d_Г$ = 0,8·10^{-3} м, диаметр изолированного провода $d_{из}$ - 0,865·10^{-3} м, сечение провода $S_{из}$ = 0,503 мм^2.

Таблица 11.20. Расчет характеристик намагничивания машины

Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0,5\Phi_{\delta ном}$	$0,75\ \Phi_{\delta ном}$	$0,9\ \Phi_{\delta ном}$	$1,0\ \Phi_{\delta ном}$	$1,1\ \Phi_{\delta ном}$	$1,15\ \Phi_{\delta ном}$
ЭДС	E	В	99	148,5	178,2	198	1217,8	227,7
Магнитный поток	$\Phi_\delta = \dfrac{60aE}{pNn}$	Вб	$0,57\cdot10^{-2}$	$0,86\cdot10^{2}$	$1\cdot10^{-2}$	$1,14\cdot10^{-2}$	$1,25\cdot10^{-2}$	$1,32\cdot10^{-2}$
Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_\delta = \dfrac{\Phi_\delta}{\alpha_\delta \tau l_\delta}$	Тл	0,323	0,484	0,581	0,646	0,71	0,743
Магнитное напряжение воздушного зазора	$F_\delta=0,8B_\delta L_\delta \cdot 10^6$	А	426	639	767,4	852,7	938	980,6
Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_Z = k_Z B_\delta$	Тл	0,927	1,39	1,67	1,854	2,04	2,13
Напряженность магнитного поля в зубцах якоря для стали 2312	H_Z	А/м	205	940	5900	16640	30000	50000
Магнитное напряжение зубцов	$F_Z = L_Z H_Z$	А	4,3	19,7	124	349	630	1050
Магнитная индукция в спинке якоря	$B_j = \Phi_\delta/(2S_j)$	Тл	0,45	0,675	0,81	0,99	0,99	1,035
Напряженность магнитного поля в спинке якоря	H_j	А/м	73	128	145	190	235	260
Магнитное напряжение ярма якоря	$F_j = L_j H_j$	А	3,4	6,0	6,8	8,9	11	12,2
Магнитный поток главного полюса	$\Phi_г=\sigma_г\ \Phi_\delta$	Вб	$0,65\cdot10^{-2}$	$0,97\cdot10^{2}$	$1,2\cdot10^{-2}$	$1,31\cdot10^{-2}$	$1,4\cdot10^{-2}$	$1,5\cdot10^{-2}$
Магнитная индукция в сердечнике главного полюса	$B_г=\Phi_г/S_г$	Тл	0,495	0,748	0,89	0,99	1,089	1,14

Продолжение таблицы 11.20.

Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	$0{,}5\Phi_{\delta ном}$	$0{,}75\ \Phi_{\delta ном}$	$0{,}9\Phi_{\delta ном}$	$1{,}0\ \Phi_{\delta ном}$	$1{,}1\Phi_{\delta ном}$	$1{,}15\ \Phi_{\delta ном}$
Напряженность магнитного поля в сердечнике главного полюса для стали 3411	$H_г$	А/м	85	127,5	153	170	220	240
Магнитное напряжение сердечника главного полюса	$F_г = L_г\, H_г$	А	4,8	7,2	8,7	9,7	12,5	13,7
Магнитная индукция в воздушном зазоре между главным полюсом и станиной	$B_{с.п} = B_г$	Тл	0,495	0,74	0,89	0,99	1,089	1,14
Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и главным полюсом	$F_{σг} = 0{,}8\, B_{с.п}\, L_{с.п}$	А	60	89	107	119	131	137
Магнитная индукция в станине	$B_с = \sigma_г \Phi_\delta / (2 S_с)$	Тл	0,65	0,975	1,17	1,3	1,43	1,5
Напряженность магнитного поля в станине (для массивных станин)	$H_с$	А/м	535	890	1227	1590	2300	2890
Магнитное напряжение станины	$F_с = L_с\, H_с$	А	66	110	151	196	284	357
Сумма магнитных напряжений всех участков магнитной цепи	$\Sigma F \quad F_\delta + F_z + F_j + F_г + F_{σг} + F_с$	А	564	925	1041	1530	2006	2550
Сумма магнитных напряжений участков переходного слоя	$F_\delta + F_z + F_j$	А	434	665	898	1211	1579	2043

90. Принимаем номинальную плотность тока (для машин со степенью зашиты IP22) $J_в = 5 \cdot 10^6$ А/м^2.

91. Число витков на полюс по (11.59)

$$w_в = \frac{F_в}{J_в q_в} = \frac{1750}{5 \cdot 10^6 \cdot 0{,}503 \cdot 10^{-6}} = 696.$$

92. Определяем номинальный ток возбуждения:
$I_{в.ном} = F_в / w_в = 1750/696 = 2{,}5$ А.

93. Плотность тока в обмотке
$j_{в.ном} = I_{в.ном} / q_в = 2{,}5/0{,}503 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^6$ А/м^2.

94. Полная длина обмотки
$L_в = 2p l_{вюср}\, w_в = 4 \cdot 666{,}7 \cdot 10^{-3} \cdot 696 = 1853$ м.

95. Сопротивление обмотки возбуждения при температуре $t = 20°$ С

$$R_в = \frac{L_п}{57 \cdot 10^6 \cdot q_B} = \frac{1853}{57 \cdot 10^6 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-6}} = 64{,}6 \text{ Ом}.$$

96. Сопротивление обмотки возбуждения при $\vartheta = 75°$ С
$R_{в75} = 1{,}22\, R_в = 1{,}22 \cdot 64{,}6 = 78{,}85$ Ом.

97. Масса меди обмотки возбужденная
$m_{м.в} = 8{,}9 L_{в.ср} \cdot 10^{-3} = 8{,}9 \cdot 1853 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 10^3 = 8{,}29$ кг.

Конструкции изоляции и крепления обмоток главных полюсов приведены в табл. 11.2—11.3.

Коллектор и щетки

98. Ширина нейтральной зоны по (11.76)
$B_{н.з} = \tau - b_п = 122 \cdot 10^{-3} = 46 \cdot 10^{-3}$ м.

99. Принимаем ширину щетки равной $b_щ = (2... 4) t_к$, по табл. П4.1 выбираем стандартные размеры щетки: $b_щ \cdot l_щ = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^{-3}$ м^2.

100. Поверхность соприкосновения щетки с коллектором
$S_щ = b_щ \cdot l_щ = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^{-3} = 2{,}5 \cdot 10^{-4}$ м^2.

101. При допустимой плотности тока $J_щ = 11 \cdot 10^4$ А/м^2 число щеток на болт

$$N_щ = \frac{I_{ном}}{p\, S_щ J_щ} = \frac{57{,}42}{2 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 11 \cdot 10^{-4}} = 1{,}08$$

Принимаем $N_щ = 1$.

102. Поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором
$\Sigma S_щ = 2p N_щ S_щ = 4 \cdot 1 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-4} = 10 \cdot 10^{-4}$ м^2.

103. Плотность тока под щетками
$J_щ = 2 I_{ном} / \Sigma S_щ = (2 \cdot 57{,}42)/(10 \cdot 10^{-4}) = 11{,}4 \cdot 10^{-4}$ А/м^2.

104. Активная длина коллектора по (11.80)
$l_к = N_щ\, (l_щ + 8 \cdot 10^{-3}) + 10 \cdot 10^{-3} = 1(25 \cdot 10^{-3} + 8\, 10^{-3}) + 10 \cdot 10^{-3} = 43 \cdot 10^{-3}$ м.

Коммутационные параметры

105. Ширина зоны коммутации по (11.75)

$$b_{з.к}=\left(\frac{b_{щ}}{t_{к}}+u_{п}-\frac{a}{p}+\varepsilon_{\hat{e}}\right)t_{\hat{e}}\frac{D}{D_{к}}=\left(\frac{10\cdot10^{-3}}{4{,}5\cdot10^{-3}}+3-\frac{1}{2}+\frac{3}{4}\right)\cdot4{,}5\cdot\frac{156\cdot10^{-3}}{125\cdot10^{-3}}=30{,}7\cdot10^{-3}\text{ м}$$

106. Отношение $b_{з.к}/(\tau - b_{П}) = 30{,}7/46 = 0{,}634$, что удовлетворяет условию $b_{з.к}/(\tau - b_{П}) = 0{,}55...0{,}7$.

107. Коэффициент магнитной проводимости паза (11.69)

$$\lambda=0{,}6\frac{h_{п}}{2r_2}+\frac{h_{ш}}{b_{ш}}+\frac{l_{л}}{l_a}+\frac{2{,}5\cdot10^5}{Al_\delta\cdot w_{с}\cdot v_a}\cdot\frac{a}{p}=0{,}6\cdot\frac{22\cdot10^{-3}}{2\cdot3{,}3\cdot10^{-3}}+\frac{0{,}8\cdot10^{-3}}{3\cdot10^{-3}}+\frac{165\cdot10^{-3}}{232\cdot10^{-3}}+$$

$$+\frac{2{,}5\cdot10^5}{20379\cdot232\cdot10^{-3}\cdot2\cdot12{,}2}\cdot\frac{1}{2}=4{,}05,$$

где $v_a = \pi Dn/60 = \pi\cdot156\cdot10^{-3}\cdot1500/60 = 12{,}2$ м/с – скорость якоря; $l_a = l_\delta$.

108. Реактивная ЭДС (11.68)

$$E_{р}=2\lambda\cdot w_{с}\cdot l_\delta\cdot A\cdot v_a\cdot10^{-6}=2\cdot4{,}05\cdot2\cdot232\cdot10^{-3}\cdot20379\cdot12{,}2\cdot10^{-6}=0{,}93\text{ В}.$$

109. Воздушный зазор под добавочным полюсом принимаем $\delta_{Д} = (1{,}5\ldots2{,}0)\delta$, при $\delta = 1{,}5\cdot10^{-3}$ м принимаем $\delta_{Д} = 3\cdot10^{-3}$ м.

110. Расчетная длина воздушного зазора под добавочным полюсом $L_{\delta Д} = k_{\delta Д}\delta_{Д} = 1{,}07\cdot3\cdot10^{-3} = 3{,}2\cdot10^{-3}$ м, где

$$k_{\delta д}=\frac{t_{z_1}+10\delta_{д}}{t_{z_1}-b_{ш}+10\delta_{д}}=\frac{16{,}9+10\cdot3\cdot10^{-3}}{16{,}9-b_{ш}+10\cdot3\cdot10^{-3}}=1{,}07.$$

111. Средняя индукция в воздушном зазоре под добавочным полюсом

$$B_{\delta д}=\frac{E'_p}{2\omega_{с}\cdot l_\delta\cdot v_a}=\frac{1{,}02}{2\cdot2\cdot232\cdot10^{-3}\cdot12{,}2}=0{,}1\text{ Тл},$$

где $E'_p = 1{,}1\,E_p = 1{,}1\cdot0{,}93 = 1{,}02$ В принимаем для обеспечения несколько ускоренной коммутации.

112. Расчетная ширина наконечника добавочного полюса согласно (11.82) и на основании предварительных расчетов ($b_{з.к}$ по п. 105)

$b_{Д.Н} < (0{,}55...0{,}75)\,b_{з.к} < (0{,}55...0{,}75)\cdot30{,}7\,10^{-3} = 17\cdot10^{-3}$ м.

113. Действительную ширину наконечника добавочного полюса принимаем в пределах в $b_{Д.Н} = (0{,}5...0{,}65)$ от полученного в п. 112 $b_{Д.Н} = 11\cdot10^{-3}$ м.

114. Магнитный поток добавочного полюса в воздушном зазоре

$\Phi_{\delta Д} = B_{\delta Д}\,l_{Д.Н}\,b_{Д.Н} = 0{,}1\cdot232\cdot10^{-3}\cdot17\cdot10\text{-}3 = 0{,}394\cdot10^{-3}$ Вб,

где $b_{Д.Н} = l_\delta$.

115. Принимаем коэффициент рассеяния добавочного полюса $\sigma_{Д} = 2{,}5$ (см. § 11.9), магнитный поток в сердечнике добавочного полюса

$\Phi_{Д} = \sigma_{Д}\,\Phi_{\delta Д} = 2{,}5\cdot0{,}394\cdot10^{-3} = 0{,}985\,10^{-3}$ Вб.

116. Сечение сердечника добавочного полюса

$S_{Д} = l_{Д.Н}\cdot b_{Д.Н}\,k_{S} = 232\cdot I0^{-3}\cdot11\cdot10^{-3}.\ 0{,}95 = 24{,}2\cdot10^{-4}$ м^2.

Сечение сердечника < сечения наконечника добавочного полюса.

117. Расчетная индукция в сердечнике добавочного полюса

$B_{С.Д} = (0{,}985\cdot10^{-3})/(24{,}2\cdot10^{-4}) = 0{,}4$ Тл.

118. Высота добавочного полюса

$L_{Д} = (D_a - 2\delta_{Д})/2 = 57\cdot10^{-3}$ м.

Результаты расчета магнитной цепи добавочных полюсов сведены в табл. 11.21.

Таблица 11.21. Расчет МДС обмотки добавочных полюсов

Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
Магнитный поток в воздушном зазоре	$\Phi_{\delta д}$	Вб	$0,394 \cdot 10^{3}$
Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_{\delta д} = \dfrac{\Phi_{\delta д}}{\alpha_д l_Z}$	Тл	0,10
Магнитное напряжение воздушного зазора	$F_{\delta д} = 0{,}8\delta_д k_{\delta д} \cdot 10^6$	А	240
Магнитная индукция в зубцах якоря	$B_{Z1} = k_{Z1} B_{\delta д}$	Тл	0,287
Напряженность магнитного поля в зубцах якоря	H_z	А/м	50
Магнитное напряжение зубцов якоря	$F_z = H_z L_z$	А	1,05
Магнитная индукция в ярме: на участке согласного направления главного потока и потока добавочных полюсов на участке встречного направления главного потока добавочных полюсов	$B_{j1} = \dfrac{\Phi_\delta + \Phi_{\delta д}}{2S_j} o$ $B_{j2} = \dfrac{\Phi_\delta - \Phi_{\delta д}}{2S_j}$	Тл Тл	0,937 0,875
Напряженность магнитного поля: на участке с индукцией $B_{.7}$ на участке с индукцией $B_в$ средняя напряженность магнитного поля в ярме	H_{j1} H_{j2} $H_{jср} = (H_{j1} - H_{j2})/2$	А/м А/м А/м	210 177 33
Магнитное напряжение якоря	$F_j = H_{jср} L_j$	А	1,5
Магнитный лоток добавочного полюса	$\Phi_д = \sigma_д \Phi_{\delta д}$	Вб	$0,985 \cdot 10^{-3}$
Магнитная индукция в сердечнике добавочного полюса	$B_{с.д} = \dfrac{\Phi_д}{b_д r_д}$	Тл	0,407
Напряженность магнитного поля в сердечнике добавочного полюса	$H_{с.д}$	А/м	336
Магнитное напряжение сердечника добавочного полюса	$F_{с.д} = H_{с.д} h_д$	А	19,65
Магнитное напряжение воздушного зазора между станиной и добавочным полюсом при $\delta_{с.д.п} = 0{,}2 \cdot 10^{-3}$ м	$F_{\delta с.д.п} = 0{,}8 B_д \delta_{с.д.п} \cdot 10^6$	А	65

Расчетная величина	Расчетная формула	Единица величины	Численное значение
Магнитная индукция в станине: на участке согласного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$B_{c1} = \dfrac{\Phi_г + \Phi_д}{2S_c}$	Тл	1,41
на участке встречного направления магнитных потоков главного и добавочного полюсов	$B_{c2} = \dfrac{\Phi_г - \Phi_д}{2S_c}$	Тл	1.39
на участке с индукцией B_{c1}	H_{c1}	А/м	2351
на участке с индукцией B_{c2}	H_{c2}	А/м	2280
Средняя напряженность магнитного поля в станине	$H_{с.ср} = \dfrac{H_{c1} - H_{c2}}{2}$	А/м	37
Магнитное напряжение участка станины	$F_c = H_{с.ср} L_c$	А	4,6
Сумма магнитных напряжений всех участков	$F_{д\Sigma} = F_{\delta д} + F_Z + F_j + F_{с.д} + F_{\delta с.д.п} + F_c$	А	322
МДС обмотки добавочного полюса	$F_д = F_{д\Sigma} + \dfrac{A\tau}{2}$	А	1565

Расчет обмотки добавочных полюсов

119. МДС обмотки добавочного полюса (табл. 11.21)

$F_Д = 1565$ А.

120. Число витков обмотки добавочного полюса на один полюс по (11.87)

$w_Д = F_Д / I = 1565/57{,}4 = 27{,}25$,

принимаем $w_Д = 28$ витков, $a_Д = 1$.

121. Предварительное сечение проводников по (11.88)

$q_Д = I_{НОМ} / a_Д J_Д = 57{,}4/510^{-6}$ м^2.

При токе $I_a < 1000$ А целесообразно принимать $a_Д = 1$. Для многослойных обмоток выбираем согласно рекомендациям в § 11.9 плотность тока $J_Д = 5 \cdot 10^6$ А/м^2.

122. Принимаем проводник обмотки добавочных полюсов: круглый провод марки ПСД (табл. 11.18) диаметром $d_Г = 3{,}75 \cdot 10^{-3}$ м (см. табл. П3.1), диаметр изолированного провода $d_{ИЗ} = 4{,}15 \cdot 10^{-3}$ м, сечение провода $q_Д = 11{,}04 \cdot 10^{-6}$ м^2.

Выполняем эскиз катушки добавочного полюса и определяем предварительное значение ширины катушки $b_{КТ.Д}$.

123. Принимаем сердечник добавочного полюса короче якоря на $1 \cdot 10^{-3}$ м с каждой стороны для создания опоры для катушки. Длина сердечника $l_Д = l_\delta = 230 \cdot 10^{-3}$ м.

124. Средняя длина витка обмотки добавочного полюса по (11.89)

$l_{д.ср} = 2(l_{д.с} + b_{д.с}) + \pi(b_{к.тд} + 2\Delta_{из}) = 2(230\cdot10^{-3} + 11\cdot10^{-3}) + \pi\,(11 + 2)10^{-3} = 529\cdot10^{-3}$ м.

$\Delta_{из} = (1{,}7\ldots2{,}2)10^{-3}$. Зазор между катушкой и сердечником принимаем $2\cdot10^{-3}$ м.

125. Полная длина проводников обмотки

$L_д = 2pl_{д.ср}w_д = 4\cdot529\cdot10^{-3}\cdot28 = 58{,}6$ м.

126. Сопротивление обмотки добавочных полюсов при температуре $\vartheta = 20°$ С по (11.90)

$$R_д = \frac{L_д}{57\cdot10^6\cdot a_д^2\, q_д} = \frac{58{,}6}{57\cdot10^6\cdot1^2\cdot11{,}04\cdot10^{-6}} = 0{,}0933 = 0{,}093 \text{ м.}$$

127. Сопротивление обмотки добавочных полюсов при $\vartheta = 75°$ С

$R_{д75} = 1{,}22R_д = 1{,}22 - 0{,}093 = 0{,}113$ Ом.

128. Масса меди обмотки добавочных полюсов

$m_д = 8{,}9\cdot10^3 l_{д.ср}\, q_д = 8{,}9\cdot10^3\cdot58{,}6\cdot11{,}04\cdot10^{-4} = 5{,}75$ кг.

Потери и КПД по (11.10)

129. Электрические потери в обмотке якоря при температуре 75° С

$P_{э.a} = I_н^2\, R_{a75} = (57{,}42)^2\cdot0{,}19 = 626$ Вт

130. Электрические потери в обмотке добавочных полюсов

$P_{э.д} = I_н^2\, R_{д75} = (57{,}42)^2\cdot0{,}113 = (57{,}42)^2\cdot0{,}113 = 372$ Вт.

131. Электрические потери в параллельной обмотке возбуждения

$P_{э.в} = I_в\, U_в = 220\cdot2{,}5 = 550$ Вт.

132. Электрические потери в переходном контакте щеток

$P_{э.щ} = 2\Delta U_щ\, I_н = 2{,}5 * 57{,}42 = 143{,}55$ Вт,

где $2\Delta U_щ\, I_н = 2{,}5$ В для марки щеток ЭГ-14 по табл. П4.2.

133. Потери на трение щеток о коллектор

$P_{т.щ} = \Sigma S_щ\; p_щ f v_к = 10\cdot10^{-4}\cdot3\;10^4\;0{,}2\cdot9{,}8 = 58{,}8$ Вт,

где $p_щ$ — давление на щетку; для щетки марки ЭГ-14 $p_щ = 3\cdot10^4$ Па; $f = 0{,}2$ — коэффициент трения щетки.

134. Потери в подшипниках и на вентиляцию определяются по рис.11.28:

$(P_{тп} + P_{вент}) = 110$ Вт.

135. Масса стали ярма якоря по (11.103)

$$m_j = 7800\frac{\pi(D-2h_п)^2 - D_0^2}{4}\, l_\delta k_c = 7800\frac{\pi\left(156\cdot10^{-3} - 2\cdot22\cdot10^{-3}\right)^2 - \left(55\cdot10^{-3}\right)^2}{4}\times$$

$$\times232\cdot10^{-3}\cdot0{,}95 = 12{,}85 \text{ кг.}$$

136 Условная масса стали зубцов якоря (11.101)

$$m_Z = 7800Zb_Z(h_1 + \frac{r_1 + r_2}{2})l_\delta k_с = 7800\cdot29\cdot6{,}2\cdot10^{-3}\left(13\cdot10^{-3} + \frac{4{,}75\cdot10^{-3} + 3{,}3\cdot10^{-3}}{2}\right)\times$$

$$\times232\cdot10^{-3}\cdot0{,}95 = 12{,}85 \text{ кг}$$

137. Магнитные потери в ярме якоря

$P_j = m_j p_j = 12{,}85\cdot3{,}26 = 42$ Вт,

где $p_j = 2{,}3p_{1{,}0/50}(f/50)^\beta B_j^2 = 2{,}3\cdot1{,}75\cdot1^2\cdot0{,}89^2 = 3{,}26$ Вт/кг.

138. Магнитные потери в зубцах якоря

$P_z = m_z p_z = 5{,}2 \cdot 13{,}8 = 71{,}7$ Вт,

где $p_z = 2{,}3 p_{1{,}0/50}(f/50)^{\beta} B_z^2 = 2{,}3 \cdot 1{,}75 \cdot 1^2 \cdot 1{,}854^2 = 13{,}8$ Вт/кг.

139. Добавочные потери

$P_{доб} = 0{,}01\ UI_{ном} = 0{,}01 \cdot 220 \cdot 59{,}7 = 131$ Вт.

140. Сумма потерь

$\Sigma P = P_{э.a} + P_{э.д} + P_{э.в} + P_{э.щ} + P_{т.щ} + (P_{т.п} + P_{вент}) + P_j + P_z + P_{доб} =$

$= 626 + 372 + 550 + 143{,}5 + 58{,}8 + 110 + 42 + 71{,}7 + 131 = 2105$ Вт.

141. Потребляемая мощность

$P_1 = P_{ном} + \Sigma P = 11000 + 2105 = 13105$ Вт;

$I_{1ном} = P_1 / U_{ном} = 13105/220 = 59{,}56$ А;

$I_{ном} = I_{1н} - I_{в.н} = 59{,}56 - 2{,}5 = 57{,}06$ А.

142. Коэффициент полезного действия

$\eta = P_{ном} / (P_{ном} + \Sigma P) = 11000/13105 = 0{,}839.$

Рабочие характеристики

При построении рабочих характеристик двигателя и уточнении его номинальных данных принимаем, что потери холостого хода двигателя практически не меняются при изменении нагрузки и составляют

$P_o = P_j + P_z + (P_{т.п} + P_{вент}) + P_{т.щ} = 42 + 71{,}7 + 110 + 58{,}8 = 282{,}5$ Вт.

При расчете характеристик принимаем напряжение питания U = 220 В, ток возбуждения соответствует номинальному значению тока возбуждения $I_в = 2{,}56$ А.

143. МДС реакции якоря. Расчеты по переходной характеристике значений F_{qd} при нескольких значениях тока якоря и графическое построение характеристики $F_{qd} = f(I)$ показывают, что эту характеристику можно аппроксимировать функцией типа: $F'_{qd} = F_{qd}(I - 15) / (I_{ном} - 15)$. Поэтому в дальнейшем будем использовать эту функцию для учета размагничивающего действия реакции якоря при построении рабочих характеристик двигателя.

144. При номинальном токе якоря $I_{ном} = 57$ А. ЭДС обмотки якоря

$E_{ном} = U - I_{ан}(R_a + R_д) - 2U_щ = 220 - 57\,(0{,}19 + 0{,}113) - 2{,}5 = 200{,}23$ В.

145. Номинальный магнитный поток в воздушном зазоре

$$\Phi_{ном} = \frac{60E_{ном}}{pN \cdot 1500} = \frac{60 \cdot 200{,}23}{2 \cdot 348 \cdot 1500} = 1{,}15 \cdot 10^{-2}\ \text{Вб}.$$

146. По характеристике холостого хода (см. рис. 11.33) находим

$B_\delta = 0{,}651$ Тл; $F_\Sigma = 1560$ А.

147. МДС обмотки возбуждения

$F_{в.н} = F_\Sigma + F_{qd} = 1560 + 220 = 1780$ А.

148. Номинальный ток возбуждения

$I_{в.ном} = F_{в.н} / w_в = 1780/696 = 2{,}56$ А.

149. Номинальный ток двигателя

$I_{1ном} = I_{ном} + I_{в.н} = 57{,}06 + 2{,}56 = 59{,}6$ А.

150. Полезная мощность на валу двигателя

$P_2 = EI_{ном} - P_o - P_{доб}(I_{ном} / I_{1ном})^2 =$

$= 200{,}23 \cdot 57{,}06 - 282{,}5 - 131(57{,}06/59{,}6)^2 = 11000$ Вт.

Таблица 11.22. Рабочие

$I_в$, А	I_a, А	E, В	F_Σ, А	$\Phi_\delta, 10^2$ Вб
2,5	10	214,4	1780	1,19
2,5	20	211,4	1753	1,185
2,5	30	208,4	1700	1,18
2,5	40	205,4	1648	1,175
2,5	56,8	200,3	1558	1,15
2,5	70	196,3	1490	1,135

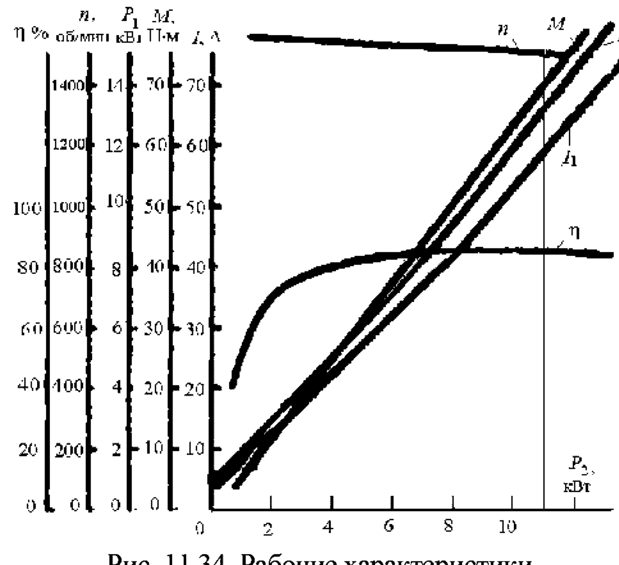


Рис. 11.34. Рабочие характеристики электродвигателя

151. Коэффициент полезного действия

$\eta = P_1/P_2 = 11000/13100 = 0{,}84$;

$P_1 = U I_{1ном} = 220 \cdot 59{,}6 = 13110$.

152. Вращающий момент

$M = 9{,}57 P_2/n = 9{,}57 \cdot 11000/1500 = 70{,}18$ Н·м

Результаты расчетов, выполненных по п. 148—152 для ряда значений тока якоря, сведены в табл. 11.22. Рабочие характеристики двигателя приведены на рис. 11.34. В соответствии с заданием рассчитан двигатель и разработаны основные элементы его конструкции. Основные данные двигателя соответствуют требованиям задания и имеют следующие номинальные значения:

$P_{ном} = 11$ кВт; $n_{ном} = 1500$ об/мин; $\eta = 84$ %; $I_{ном} = 57{,}06$ А;

$I_{1ном} = 59{,}6$ А; $I_{в.ном} = 2{,}56$ А;

$P_{1ном} = 13110$ Вт.

Тепловой расчет по § 11.11

153. Расчетные сопротивления обмоток

$R_{aт} = R_{aн}\, k_т = 0{,}19 \cdot 1{,}15 = 0{,}2185$ Ом,

где $k_т$ — поправочный коэффициент, с помощью которого приводятся температуры обмоток к предельным допустимым температурам; при классе нагревостойкости B $k_т = 1{,}15$.

$R_{д.т} = R_{д.н} \cdot 1{,}15 = 0.113 \cdot 1{,}.15 = 0{,}13$ Ом;

$R_{в.т} = R_{в.н} \cdot 1{,}15 = 84{,}3\ 1{,}15 = 97$ Ом

154. Потери в обмотках

$P_{aт} = I_н^2\, R_{aт} = 57^2 \cdot 0{,}2185 = 710$ Вт,

$P_{дт} = I_н^2\, R_{дт} = 57^2 \cdot 0{,}130 = 422$ Вт,

$P_{вт} = I_н^2\, R_{вт} = 2{,}56^2 \cdot 97 = 636$ Вт

характеристики двигателя

n, об/мин	M, Н·м	P_2, Вт	I_1, А	P_1, Вт	η,%
1553	11,79	1858	12,56	2763	67,2
1538	24,9	3945	22,56	4963	79,5
1522	37,65	5934	32,56	7163	82,8
1506	50,9	7955	42,56	9363	85
1501	70,3	10 965	59,36	13060	84
1490	85,5	13 263	72,56	15 963	83,1

155. Коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности якоря (по рис. 11.29) $\alpha_a = 85$ Вт/(м^2·°С).

156. Превышение температуры охлаждаемой поверхности якоря по (11.133)

$$\Delta\vartheta_a = \frac{P_{aт}\left(2l_\delta \;\; l_{aср}\right) + P_{ст}}{\pi D l_a \alpha_a} = \frac{710(2\cdot 0{,}232/0{,}794) + 113{,}2}{\pi\cdot 156\cdot 232\cdot 85} = 54{,}7\ °С.$$

157. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки якоря по (11.135)

$$\Delta\vartheta_{из.п} = \frac{P_{aт}\left(2l_\delta \;\; l_{aср}\right)}{Z\text{Ï}_{п}/\delta}\left(\frac{r_1 + r_2}{8\lambda'_{экв}} + \frac{b_{из}}{\lambda_{экв}}\right) = \frac{710(2\cdot 0{,}232/0{,}794)}{29\cdot 51{,}4\cdot 10^{-3}\cdot 232\cdot 10^{-3}}\left(\frac{4{,}75 + 3{,}3}{8\cdot 1{,}4\cdot 10^{3}} + \frac{0{,}5\cdot 10^{-3}}{0{,}16}\right) =$$

$= 5{,}1$ °С,

где $П_п = \pi(r_1 + r_2) + 2h_1 = \pi\,(4{,}75 + 3{,}3)\cdot 10^{-3} + 2\cdot 13\cdot 10^{-3} = 51{,}4\cdot 10^{-3}$ м;

$\lambda'_{экв} = 1{,}4$ Вт/(м^2·°С);

$\lambda_{экв} = 0{,}16$ Вт/(м^2·°С).

158. Превышение температуры охлаждаемой поверхности лобовых частей обмотки якоря по (11.134)

$$\Delta\vartheta_{пов.л} = \frac{P_{aт}\left(1 - 2l_\delta \;\; l_{aср}\right)}{\pi D 2 l_{в}\alpha_{л}} = \frac{710\left(1 - (2\cdot 232\cdot 10^{-3}/0{,}794)\right)}{\pi\cdot 156\cdot 10^{-3}\cdot 2\cdot 49\cdot 10^{-3}\cdot 85} = 72{,}3\ °С,$$

где $\alpha_л = 85$ Вт/(м^2·°С) — коэффициент теплоотдачи с лобовых поверхностей обмотки якоря (см. рис. 11.29); $l_в = 0{,}4\tau = 0{,}4\cdot 122\cdot 10^{-3} = 49\cdot 10^{-3}$ м — вылет лобовых частей обмотки якоря.

159. Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки якоря по (11.136)

$$\Delta\vartheta_{из.л} = \frac{P_{aт}\left(1 - 2l_\delta \;\; l_{aср}\right)}{2Z\text{Ï}_{л} l_{л}}\left(\frac{h_{п}}{8\lambda'_{экв}}\right) = \frac{710\left(1 - (2\cdot 232\cdot 10^{-3}/0{,}794\cdot 10^{-3})\right)}{2\cdot 29\cdot 33{,}7\cdot 0{,}165}\left(\frac{22\cdot 10^{-3}}{8\cdot 1{,}4}\right) = 1{,}8\ °С,$$

где $П_л = (1 + \pi/2)(r1 + r2) + h1 = (1 + \pi/2)(4{,}75 + 3{,}3)\cdot 10^{-3} + 13\cdot 10^{-3} = 33{,}7\cdot 10^{-3}$ м.

160. Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающего воздуха по (11.138)

$$\Delta\vartheta_{aср} = \left(\Delta\vartheta_a + \Delta\vartheta_{из.п}\right)\frac{2l_\delta}{l_{aср}} + \left(\Delta\vartheta_{пов.л} + \Delta\vartheta_{из.л}\right)\cdot\left(1 - \frac{2l_a}{l_{aср}}\right) + \Delta\vartheta_{\text{âîç}} =$$

$$= (5{,}3 + 5{,}1)\frac{2\cdot 232}{794} + (77 + 0{,}42)\cdot\left(1 - \frac{2\cdot 232}{794}\right) = 39\,°С$$

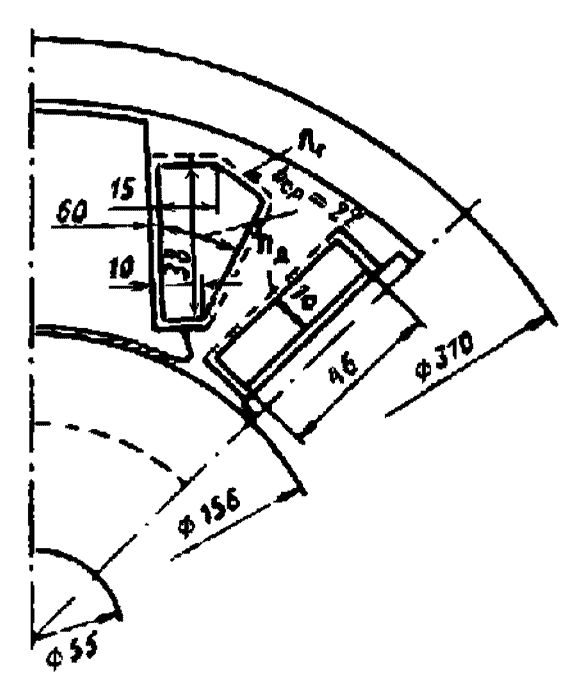


Рис. 11.35. К определению наружной поверхности охлаждения обмоток главных и добавочных полюсов

161. Сумма потерь, отводимых воздухом» охлаждающим внутренний объем двигателя, согласно (11.120)

$\Sigma P' = \Sigma P \quad P_{\text{в.н}} = \Sigma P - 0{,}1(P_{\text{в.т}} + P_{\text{д.т}}) =$
$= 2103 - 0{,}1\,(636 + 422) = 1997$ Вт.

162. Условная поверхность охлаждения двигателя по (11.132)

$S_{\text{охл}} = \pi D_{\text{вн}}(l_\delta + 2l_{\text{воз.л}}) = \pi \cdot 310 \cdot 10^{-3}\,(232 \cdot 10^{-3} +$
$+ 92 \cdot 10^{-3}) = 0{,}316$ м^2.

163. Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_{\text{воз}} = \sum P' / (S_{\text{охл}} a_{\text{в}}) = 1997/(0б316 \cdot 650) = 9{,}7°\text{ C},$$

где $\alpha_{\text{в}} = 650$ Вт/(м^2 ° С) по рис. 11.32.

164. Среднее превышение температуры обмотки якоря над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta'_{a.\text{ср}} = \Delta\vartheta_{a.\text{ср}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}} = 39 + 9{,}7 = 48{,}7°\text{ C}.$$

165. Превышение температуры наружной поверхности катушки возбуждения над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta\vartheta_{\text{в.т}} = \frac{P'_{\text{в.т}}}{2pS_{\text{в}}\alpha_{\hat{a}}} = 53{,}I°\text{ C.},$$

где $P'_{\text{в.т}}$, определяется согласно (11.120); $S_{\text{в}}$ — внешняя поверхность катушки обмотки возбуждения; $S_{\text{в}} = l_{\text{в.ср}}\,П = 830 \cdot 10^{-3} \cdot 65 \cdot 10^{-3} = 53{,}91 \cdot 10^{-3}$ м^2 (рис. 11.35).

166. Перепад температуры в изоляции катушки

$$\Delta\vartheta_{\text{из.в}} = \frac{kP'_{\text{в}}}{2pS_{\text{в}}}\left(\frac{b_{\text{в.ср}}}{8\lambda'_{\text{экв}}} + \frac{\Delta b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экв}}}\right) = \frac{0{,}9 \cdot 671}{4 \cdot 53{,}91 \cdot 10^{-3}}\left(\frac{22 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 1{,}4} + \frac{0{,}2 \cdot 10^{-3}}{0{,}16}\right) = 9°\text{ C}.$$

167. Среднее превышение температуры обмотки возбуждения над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta_{\text{ср.в}} = \Delta\vartheta_{\text{п.в}} + \Delta\vartheta_{\text{из.в}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}} = 53{,}1 + 9 + 9{,}7 = 71{,}8°\text{ C}.$$

168. Превышение температуры наружной поверхности добавочного полюса над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta\vartheta_{\text{д.в}} = \frac{kP'_{\text{д.т}}}{2p\,S_{\text{д}}\alpha_{\text{д}}} = \frac{0{,}9 \cdot 422}{4 \cdot 28 \cdot 10^{-3} \cdot 48} = 70°\text{ C},$$

где $S_{\text{д}} = l_{\text{д.ср}}\,П_{\text{д}} = 506 \cdot 10^{-3} \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 28{,}0\ 10^{-3}$ м^2,

$\alpha_{\text{д}} = 48$ Вт/м2 (см. рис. 11.29).

169. Перепад температуры в изоляции катушки добавочного полюса для обмотки прямоугольного провода (11.142)

$$\Delta\vartheta_{\text{из.д}} = \frac{P'_{\text{д.т}}}{2p_{\text{д}}S_{\text{д}}}\frac{b_{\text{кт.д}}}{8\lambda'_{\text{экв}}} = \frac{0{,}9 \cdot 422}{4 \cdot 28 \cdot 10^{-3}}\frac{14 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 1{,}4} = 4{,}2°\text{ C}.$$

Катушки добавочных полюсов не имеют наружной изоляции ($\Delta b_{\text{из.д}} = 0$).

170. Среднее превышение температуры обмотки добавочных полюсов над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\vartheta_{\text{д.ср}} = \Delta\vartheta_{\text{д}} + \Delta\vartheta_{\text{из.д}} + \Delta\vartheta_{\text{воз}} = 74{,}6 + 4{,}2 + 9{,}7 = 88{,}5°\text{C}.$$

171. Превышение температуры наружной поверхности коллектора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta\vartheta_к = \frac{P_щ + P_{т.щ}}{S_к \alpha_к} = \frac{141{,}75 + 58{,}8}{\pi \cdot 125 \cdot 10^{-3} \cdot 43 \cdot 10^{-3} \cdot 140} = 84{,}8° \text{ C}.$$

где $S_к = \pi D_к l_к$ — поверхность охлаждения коллектора; $\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи поверхности коллектора (см. рис. 11.31),

Вентиляционный расчет

Проектируемый двигатель имеет аксиальную вентиляцию, которая обеспечивается встроенным вентилятором центробежного типа.

172. Необходимое количество охлаждающего воздуха по (11.151)

$$Q_{воз} = \frac{\Sigma P'}{1100 \cdot \Delta\vartheta'_{воз}} = 1893/(1100 - 18{,}8) = 0{,}096 \text{ м}^3,$$

где $\Sigma P' = (P_{1ном} - P_{ном})0{,}9$; $\Delta\vartheta'_{воз} = \Delta\vartheta_{воз} = 2 \cdot 9{,}4 = 18{,}8°$ C.

173. Принимаем наружный диаметр центробежного вентилятора равным приблизительно $0{,}9d_c$ (где d_c — внутренний диаметр станины):

$D_2 = 0{,}9d_c = 0{,}9 \cdot 276 \cdot 10^{-3} \approx 250 \cdot 10^{-3}$ м.

174. Окружная скорость вентилятора (по наружному диаметру)

$v_2 = \pi D_2 n/60 = \pi \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 1500/60 = 19{,}6$ м/с.

175. Внутренний диаметр колеса вентилятора (11.155)

$D_1 = (1{,}25...1{,}3)D = 1{,}25 \cdot 156 \cdot 10^{-3} = 195 \cdot 10^{-3}$ м.

176. Окружная скорость вентилятора (по внутреннему диаметру)

$v_1 = \pi D_1 n/60 = \pi \cdot 195 \cdot 10^{-3} \cdot 1500/60 = 15{,}3$ м/с.

177. Ширина лопаток вентилятора (11.156)

$b_{л.в} = (0{,}12...0{,}15)\, D_2 = 0{,}15 \cdot 25010^{-3} = 38 \cdot 10^{-3}$ м.

178. Число лопаток принимаем $N_1 = 17$.

179. Давление вентилятора при холостом ходе (11.157)

$H_0 = \eta_{a0}\, \rho(v_2^2 - v_1^2) = 0{,}6 \cdot 1{,}2(19{,}6^2 - 15{,}3^2) = 108$ Па,

где η_{a0} — аэродинамический КПД вентилятора в режиме холостого хода: $\eta_{a0} = 0{,}6$.

180. Максимально возможное количество воздуха в режиме короткого замыкания

$Q_{в.max} = 0{,}42 v_2 S_2 = 0{,}42 \cdot 19{,}6 \cdot 0{,}0275 = 0{,}227$ м^3/с,

где $S_2 = 0{,}92\pi D_2 b_{л.в} = 0{,}92\pi \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 38 \cdot 10^{-3} = 0{,}0275$ м^2 — входное сечение вентилятора.

181. Аэродинамическое сопротивление Z вентиляционной системы машины (см. рис. 7.5)

$Z = 1{,}4\ 10^3 \cdot$Па$\cdot$с^2/м^6.

182. Действительный расход воздуха по (11.159)

$$Q_{воз} = Q_{в.max}\sqrt{H_0/(H_0 + ZQ^2_{в.max})} = 0{,}227\sqrt{\frac{108}{108 + 1{,}4 \cdot 10^3 \cdot 0{,}227^2}} = 0{,}176 \text{ м}^3/\text{с}$$

183. Действительное давление вентилятора

$$H = \frac{H_0 \cdot ZQ^2_{\text{в.max}}}{H_0 + ZQ^2_{\text{в.max}}} = \frac{108 \cdot 1{,}4 \cdot 10^3 \cdot 0{,}227^2}{108 + 1{,}4 \cdot 10^3 \cdot 0{,}227^2} = 43{,}45 \text{ Па}.$$

184. Мощность, потребляемая вентилятором, по § 7.7:

$P_{\text{вент}} = 0{,}175(v_1/10)^2 \cdot Q_{\text{ном}} \cdot 10^3 = 0{,}175(15{,}3/10)^2 \cdot 0{,}176 \cdot 10^3 = 72$ Вт

185. Потери мощности на вентиляцию и в подшипниках (уточнение п. 134)

$P_{\text{т}} = P_{\text{т.щ}} + P_{\text{т.мех}} + P_{\text{вент}} = 58{,}8 + 55 + 72 = 186$ Вт,

где $P_{\text{т.мех}}$ принимается ориентировочно $(P_{\text{тп}} + P_{\text{вент}})/2$.

186. Номинальный КПД электрической машины (см. п. 142), уточненный по результатам вентиляционного расчета,

$\eta_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} \cdot 100/(P_{\text{ном}} + \Sigma P) = 11000 \cdot 100/13120 = 83{,}8\%$,

Механические расчеты коллектора, вала и крепления главных и добавочных полюсов выполняются по методике, изложенной в главе восьмой.

Вывод: по техническим данным спроектированный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ и техническому заданию.

Глава двенадцатая.

Системы автоматизированного проектирования электрических машин

Уже в недалеком будущем системы автоматизированного проектирования электрических машин (САПР ЭМ) будут занимать основное место в конструкторских и технологических бюро электротехнических заводов и НИИ.

Каждый день на заводах и НИИ электротехнической промышленности ведется работа по созданию новых и модернизации выпускаемых электрических машин. От интенсивности работ по созданию новой и модернизации старой продукции зависит экономическое положение заводов и НИИ. Однако большинство инженеров-электромехаников ежедневно значительную часть времени тратят на стандартные расчеты и корректировку чертежей. Системы автоматизированного проектирования электрических машин (САПР ЭМ) призваны освободить инженеров от рутинной работы, обеспечив большую творческую отдачу инженерных кадров.

В первые годы существования САПР ЭМ считали, что они, в основном, будут применяться при проектировании новых электрических машин. Однако практика показала, что САПР ЭМ лишь частично могут заменить творческие коллективы ученых и инженеров, разрабатывающих новые машины, при этом САПР ЭМ работают в интерактивном режиме. Создание банков данных, машинную графику, пересчет на основе базовой машины других машин серии САПР ЭМ могут взять на себя, и на этом пути получен значительный экономический эффект. Растущие объемы выпуска различных модификаций основного исполнения, наличие мелких серий электрических машин, бесконечные пересчеты и необходимость строжайшей экономии материальных ресурсов оправдывают расходы на САПР ЭМ, хотя каждая ЭВМ требует материальных затрат и увеличивает стоимость выпускаемой продукции. САПР ЭМ необходимы в современном электромашиностроении, но они не заменяют творческие коллективы ученых, инженеров-расчетчиков, конструкторов и технологов. САПР ЭМ дополняют научный потенциал НИИ, заводов отрасли, обеспечивая сокращение сроков создания новых электрических машин, поднимая их технический уровень [10].

САПР ЭМ развиваются как открытые системы, т. е. они обладают свойством удобства включения новых расчетных методов и технических средств. Тесное взаимодействие человека и ЭВМ в процессе проектирования — основной принцип построения и эксплуатации САПР

ЭМ. Монополии человека в творческом начале и принятии основных решений ЭВМ не угрожают, а только расширяют возможности проектировщика.

Применение ЭВМ для проведения расчетов по существующим формулам проектирования началось в конце 50-х годов. Автоматизация расчетов позволила повысить точность и сократить время расчетов. К середине 70-х годов отдельные расчеты стали объединиться в комплексные системы, обеспечивающие выполнение работ от приема заказа до технического проекта и изготовления опытной партии электрических машин [4]

На современном этапе формирования САПР ЭМ происходит перестройка процесса проектирования, когда многочисленные и разнообразные по содержанию этапы проектирования объединяются в единую систему, в основе которой лежит использование универсальных цифровых ЭВМ. САПР ЭМ влияют на необходимость создания новых математических моделей проектирования, удобных для ЭВМ.

Укрупненная структурная схема САПР ЭМ показана на рис. 12.1.

Современная САПР ЭМ — это организационно-техническая система, состоящая из комплекса средств автоматизации проектирования, взаимосвязанного с коллективом разработчиков электрических машин (пользователем системы). САПР ЭМ изменяют не только процесс проектирования, но и облик конструкторского и технологического отделов. Изменились рабочие места конструктора, помещения для хранения чертежно-конструкторской документации, растет престижность инженера-конструктора. Непосредственная связь ЭВМ со станками и отдельными производственными участками — будущее электромашиностроительных заводов.

Комплекс средств САПР ЭМ, как и комплекс других САПР, состоит из совокупности следующих подсистем и компонентов: методов автоматизированного проектирования

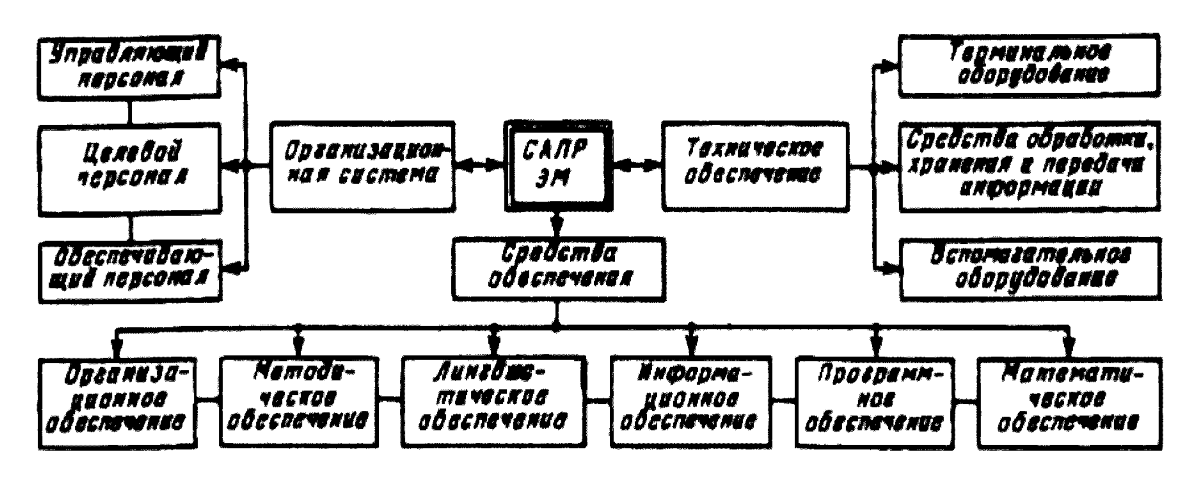


Рис. 12.1. Укрупненная структурная схема САПР

электрических машин (математическое обеспечение); технических средств для приема, обработки, хранения и передачи информации (техническое обеспечение); программ, реализующих как проектные процедуры, так и операции по управлению процессом проектирования и техническими средствами (программное обеспечение); информационной базы системы (информационное обеспечение); языков для представления объекта проектирования, для общения пользователя с системой и для программирования (лингвистическое обеспечение); документации, отражающей состав и функционирование средств автоматизированного проектирования (методическое обеспечение); организационной схемы процесса проектирования (организационное обеспечение).

Математическое обеспечение включает совокупность математических моделей и алгоритмов проектирования, представленных в заданной форме.

Техническим обеспечением является совокупность взаимосвязанных технических средств, Это ЭВМ, аппаратура сопряжения с линиями связи, средства отображения и документирования информации, аппаратура взаимодействия проектировщика с ЭВМ и САПР в целом устройства связи с производственными объектами и др.

Программное обеспечение подразделяется на системное, проблемное и сервисное.

Системное программное обеспечение предназначено для организации работы комплекса средств САПР (включая операционную систему). Проблемное программное обеспечение ориентировано на выполнение определенных проектных процедур (такие программы оформляются обычно в виде пакетов прикладных программ). Сервисное обеспечение осуществляет общение пользователя с системой, редактирование и преобразование формы представления информации.

Информационное обеспечение — совокупность в определенной форме данных. К ним относятся массивы справочно-нормативной и технологической информации, словари, отображающие понятийный состав языков, описания заданий и языков управления системы, массивы информации об объекте проектирования. При этом должна применяться единая система классификации и кодирования технико-экономической информации, унифицированная система документации и массивов данных об объекте проектирования.

Под лингвистическим обеспечением понимается совокупность языков проектирования, включая термины и определения, правила формализации естественного языка предметной области проектирования и методы сжатия и развертывания текстов. В настоящее время

сложились три группы языков: языки программирования, языки описания объекта проектирования и языки управления проектированием.

К методическому обеспечению относят документы, в которых отражены состав, правила отбора и эксплуатации средств автоматизации проектирования.

В организационное обеспечение входят документы, устанавливающие перечень участвующих в проектировании подразделений, их функции и связи между ними, а также устанавливающие форму представления результатов проектирования и порядок рассмотрения проектных документов.

Разработка САПР ЭМ в полном объеме занимает продолжительное время, поэтому целесообразно вводить в эксплуатацию части системы по мере их готовности. Введенный в эксплуатацию базовый вариант системы в дальнейшем расширяется. Постоянный прогресс электромашиностроения, вычислительной техники и вычислительной математики приводят к появлению новых, более совершенных математических моделей и программ, которые должны заменять старые, менее удачные аналоги.

Эффективность работы САПР ЭМ существенно зависит от структуры и организации комплекса технических средств. Для обеспечения эффективности автоматизированного проектирования предусматривается возможность использования проектировщиком различных режимов работы. Такими режимами являются пакетная обработка, режим разделения времени, режим реального масштаба времени компьютерной сети.

При пакетной обработке решение задач ведется по жестким алгоритмам автоматически, без вмешательства проектировщика. При этом оператор ЭВМ формирует пакеты задач, обеспечивающие достаточно полное использование ресурсов ЭВМ.

В режиме разделения времени с ЭВМ одновременно взаимодействуют несколько пользователей (каждый со своего терминала), занятых отладкой программ, вводом данных, формированием или корректировкой модели объекта проектирования и т. д. При этом ЭВМ по очереди представляет каждому пользователю необходимые ресурсы, так что создается иллюзия монопольного владения машиной.

В режиме реального масштаба времени ЭВМ управляет технологическим оборудованием, специальными устройствами ввода и документированием графической информации, обеспечивает оперативный диалог проектировщика с ЭВМ, что важно при решении не полностью формализованных проектных задач.

Важной особенностью компьютерной сети является наличие различных программных и аппаратных средств диагностики и восстановления. Последние позволяют продолжать или восстанавливать вычислительный процесс при сбое.

Большинство задач проектирования электрических машин сочетает в себе необходимость выполнения как вычислений, так и процедур графического характера. Основные затраты времени конструктора идут не на выбор принципиального решения, четко вырисовываемого в его воображении, а на перенос мысленного образа на бумагу, с соблюдением всех правил машиностроительного черчения. Предполагается, что роль чертежей в процессе проектирования и производства, содержание и форма конструкторской документации должны претерпеть существенные изменения. Результатом применения САПР ЭМ все в большей мере будут программы управления технологическим оборудованием, представленные на машинных носителях. Однако, в настоящее время и ближайшем будущем роль чертежей и других графических документов в процессе подготовки производства электрических машин остается важной.

В основе программного обеспечения лежит модульный принцип. Преимущества модульного программирования заключаются в том, что составление программы сводится к синтезу ее из модулей, причем последние можно считать элементами проблемно-ориентированного языка. Модули можно унифицировать, т. е. один модуль может использоваться для нескольких программ и они могут формироваться и отлаживаться независимо друг от друга разными программистами, в разных системах программирования. Отладка программ упрощается тем, что в момент объединения модулей каждый из них уже отлажен. Благодаря модульной структуре программу можно легко изменить путем создания новых модулей, или преобразованием некоторых из уже имеющихся, или перестановкой модулей, определяющих процесс обработки данных. Модульная структура программ облегчает организацию работы больших коллективов программистов и эксплуатацию программ.

Среди языков программирования САПР ЭМ различают машинные, проблемно-ориентировочные и машинно-ориентировочные.

Языки программирования геометрических объектов (графические языки) развиваются в двух направлениях. Первое, более распространенное направление, заключается в создании на одном из процедурных языков программирования набора графических подпрограмм. Совокупность обращений к этим подпрограммам условно квалифицируют как графический язык, являющийся расширением

исходного языка геометрическими переменными и операциями. Такой подход удобен тем, что его применение не сопряжено с изменением синтаксиса исходного языка, при этом легко сочетаются действия над графическими изображениями и решения вычислительных задач. К недостаткам метода относится некоторое усложнение оператора вызова графических подпрограмм. Второе направлений, производимых над элементами изображения. Программа на графическом языке преобразуется транслятором в систему команд на одном из универсальных языков, а затем — в систему команд ЭВМ. Такая схема позволяет включать программы, написанные на графическом языке, в программы, составленные на универсальном языке.

Существуют два способа хранения геометрических данных: ориентация на изделие (трехмерная модель), ориентация на чертеж (двухмерная модель). В случае ориентации на изделие необходимо иметь программы геометрического процессора системы, осуществляющие преобразование данных трехмерной модели объекта в двухмерные отображения в виде стандартных проекций, сечений, разрезов. Когда в системе принята ориентация на чертеж, то данные об объекте проектирования хранятся в 1 таком виде, который требуется для получения конструкторского документа. Если проектируются машины, имеющие аналоги или состоящие из типовых, унифицированных элементов, целесообразно строить систему, ориентированную на чертеж. Если же проектируются изделия, не имеющие аналогов или слабо поддающиеся унификации, желательно использовать принцип ориентации на изделие.

В настоящее время при создании программной среды САПР электрических машин широко применяются наряду с языками С++, FORTRAN, в среде Power Station, программные продукты: Math CAD, Matlab, Autocad, существенно облегчающие реализацию конкретных алгоритмов проектирования.

Средства автоматизации проектирования непрерывно совершенствуются, обеспечивая применение САПР ЭМ и отдельных ее подсистем на всех электромашиностроительных заводах.

Наибольшие достижения в создании САПР ЭМ достигнуты при создании САПР асинхронных двигателей (САПР АД). Система позволяет определить оптимальные размеры активной части машины, удовлетворяющие техническим и технологическим требованиям, выдавать отдельные чертежи конструкции (общий вид, узлы и детали) на графопостроитель, корректировать конструкторско-технологическую документацию в процессе разработки и серийного производства с минимальным использованием ручных работ. С помощью подсистемы оптимизационного расчетного проектирования, исходя из технического

задания и критериев оценки технико-экономических показателей разрабатываемых двигателей, осуществляется определение оптимальных электромагнитных характеристик и геометрических размеров активной части машины. Подсистема расчетного проектирования используется также при разработке многочисленных модификаций двигателей.

При расчете двигателя используют 100 исходных данных. Часть из них предопределена требованиями эксплуатации, материалами, используемыми в производстве, опытом проектирования предшествующих серий. Другая часть устанавливается на основании предварительных исследований. К ним относятся выбор класса нагревостойкости изоляции, степени унификации различных исполнений и др.

Задача оптимального расчетного проектирования является многокритериальной. В качестве основного критерия принимают критерий минимума суммарных затрат, учитывающий стоимость изготовления двигателя и расходы на его эксплуатацию. Кроме поиска оптимальных параметров машины по основному критерию осуществляется также дополнительный поиск по минимуму размеров сердечника статора. Возможно использование и других критериев: максимума полезной мощности, минимальной стоимости машины, минимума массы и др.

В математической модели асинхронного двигателя предусмотрены два вида ограничений: ограничения, вытекающие из требований стандартов (допустимые значения пускового и максимального моментов, пускового тока, температуры обмотки) и требований надежности (скорости нарастания температуры в режиме короткого замыкания); связь лимитеров с конструктивными и технологическими требованиями — минимальной шириной зубца, высотой ярма статора и т. д.

Узлы и детали всех двигателей, входящих в отрезки серии (группы смежных высот осей вращения), как правило, имеют геометрически подобные формы. Некоторые детали являются подобными для всех машин серии. Характерна также широкая унификация узлов, деталей, материалов в пределах одной высоты оси вращения, а по некоторым элементам — ив пределах ряда высот. Это позволяет обобщить геометрию конструкции, другими словами, создать ее математическую модель. Модель дает возможность по размерам активной части машины вычислять размеры сборочных единиц и отдельных деталей асинхронного двигателя.

Проектировщик, работая с ЭВМ, может работать в одном из следующих режимов: генерация математической модели, оптимизация параметров в автоматическом режиме, оптимизация параметров в режиме диалога,

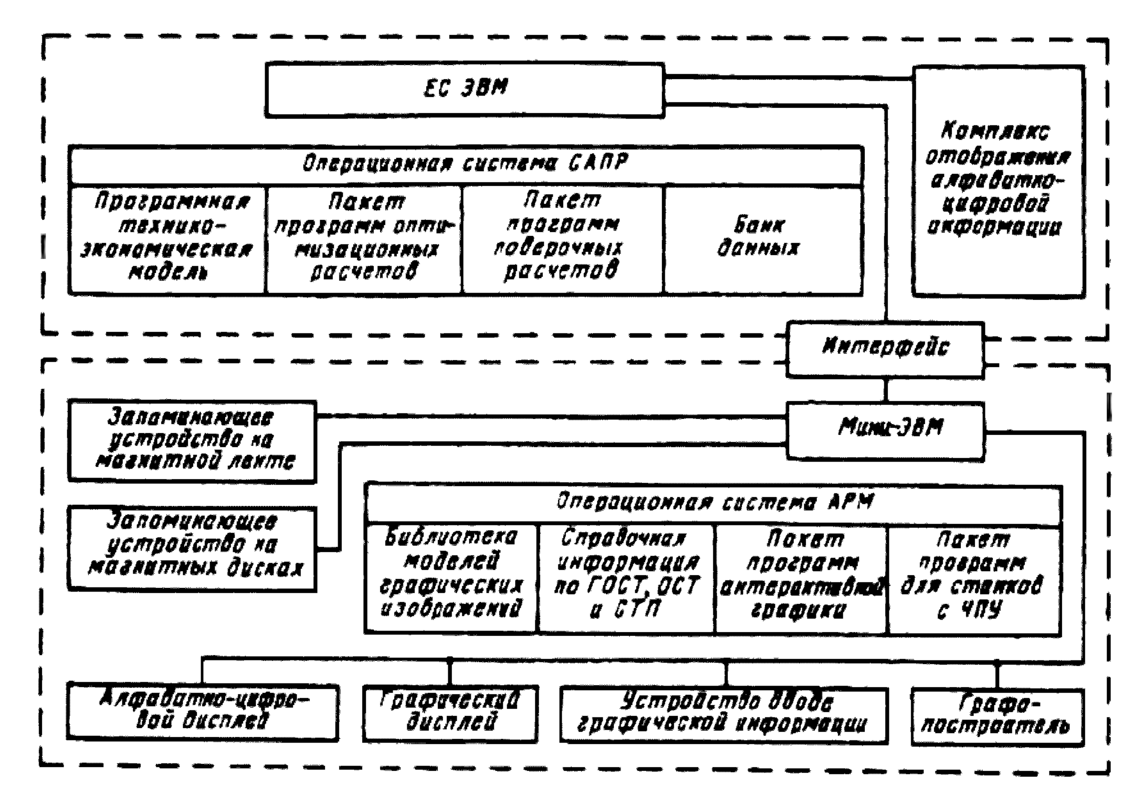


Рис. 12.2. Структурная схема САПР АД

конструирование в режиме диалога, вывод графической информации на плоттер, корректировка чертежей в производстве, представление по запросам конструкторской и технологической информации.

Структурная схема САПР АД представлена на рис. 12.2 Выбор основных параметров специальной электрической машины (мощности, частоты вращения, массогабаритных показателей системы охлаждения и т. д.) должен производиться на основании общей оценки. Так, в основу выбора конструктивной схемы малошумного электромашинного преобразователя положен комплексный подход к объединению двигателя и генератора в одном корпусе, исключение резонансов конструкции с основными вибровозмущающими силами, композиционная обработка конструкций, уменьшающая влияние производственно-технологических факторов, т.е. разрабатывается методология обеспечения малошумности конструкции.

Алгоритм разработки конструктивной схемы включает взаимозависимый выбор размеров электромагнитного ядра электрической машины на основе технических требований, затем по результатам предварительных электромагнитных расчетов определяются размеры ротора. После чего в диалоговом режиме по выбранным критериям происходит корректировка размеров ротора. Аналогично происходит выбор размеров корпуса, но уже по своим критериям, и, наконец, выбор подшипниковых узлов.

В результате операций создается конструктивная схема электрической машины. Математическая модель конструктивной схемы не содержит подробной проработки каждой сборочной единицы по их конфигурации и уточненным размерам, а ограничивается лишь упрощенными формами, наиболее характерными для общего построения данного исполнения машины.

Основу подсистемы оптимального проектирования определяет сводная математическая модель, состоящая из следующих расчетов: электромагнитного, размеров, конструктивной схемы, теплового, механического, виброакустического.

Математическая модель электромагнитного расчета включает в себя расчеты магнитной цепи, холостого хода, номинального и пускового режимов. Тепловой расчет определяет превышение температуры различных частей машины. Математическая модель расчета виброакустических характеристик предусматривает расчет магнитных и подшипниковых шумов и вибраций, а также вентиляционного шума. Механический расчет узла вал-подшипники обеспечивает расчеты вала и выбор подшипников качения.

В подсистеме оптимального проектирования предусмотрены признаки, указывающие на марки используемых материалов, варианты фрагментов конструкций электрических машин (например, фрагменты сборочных единиц, формы частей паза) и т. п. Эти признаки определяют выбор расчетных формул в математических моде-

В качестве ограничений в подсистеме оптимального проектирования выбираются требования стандартов (допустимые значения кратности начального пускового и максимального моментов, превышение температуры обмотки статора, долговечность подшипников, запас прочности вала и т. п.). Кроме того, в этой подсистеме предусмотрены ограничения конструкторского и технологического характера (ширина верха и низа зубца статора, высота спинки статора, расстояние от лобовой части обмотки до щита).

Поиск оптимального варианта проводят по нескольким критериям в режиме диалога конструктора с ЭВМ. Эти критерии выбирают из списка критериев: масса машины, момент инерции ротора, общий уровень звуковой мощности, интегральный критерий по виброускорениям, КПД и т. д.

Подсистема оптимального проектирования позволяет уточнить размеры активной части и параметров машины в первоначально полученной конструктивной схеме и сделать ее основой для разработки общего вида электрической машины, т. е. перейти таким образом к подсистеме конструирования.

Подсистема конструкторского проектирования предусматривает выпуск чертежей общего видя сборочных единиц и деталей, а также текстовой конструкторской документации.

Структурная схема подсистемы конструкторского проектирования приведена на рис. 12.3.

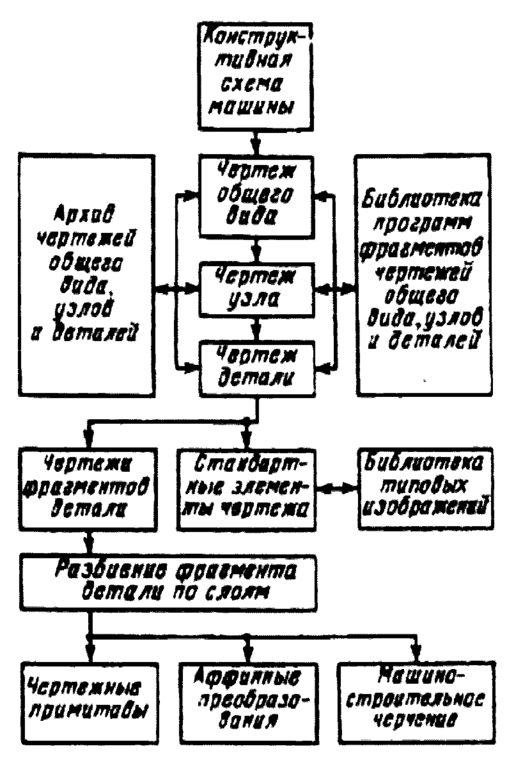


Рис. 12.3. Структурная схема подсистемы конструкторского проектирования

Разработки общего вида машины ведут на основе конструктивной схемы с использованием типовых фрагментов единиц и интерактивной графики. Конструктивная схема является основой, на которой формируется общий вид путем добавления отдельных фрагментов сборочных единиц.

Разработку чертежей сборочных единиц и деталей проводят на основе общего вида с использованием типовых фрагментов деталей.

В САПР СЭМ предусматривается разработка обширной библиотеки фрагментов сборочных единиц и деталей. Каждый из фрагментов имеет свою математическую модель. Изменяя входные (параметры) модели, можно получить фрагменты с необходимыми размерами. Библиотека фрагментов сборочных единиц и деталей позволяет конструктору значительно повысить производительность труда и сократить сроки разработки чертежей. Этот этап работы обеспечивается пакетом графических подпрограмм функционального уровня и программой, связывающей параметры чертежа конструктивной схемы с координатами характерных графических точек, необходимых для функционирования графических программ.

Математическое обеспечение используемых при проектировании ЭВМ позволяет по-разному построить графические программы выполнения узлов и деталей электрической машины.

Разработка математической модели сборочных единиц целесообразна только в тех случаях, когда сборочная единица для ряда машин является универсальной, т. е. находит применение при разработке типов электрических машин. К таким сборочным единицам относятся активные части электрической машины: статор обмотанный и

необмотанный машин переменного тока, короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя и т. д.

В процессе создания САПР СЭМ разработаны математические модели чертежей активной части машин переменного тока. Исходными данными для выпуска чертежей активной части являются результаты электромагнитного расчета.

Программы фрагментов сборочных единиц и деталей создают с использованием интерактивной графической системы. Для программирования фрагмента необходимо задать положение базовой системы координат сборочной единицы или детали, а также описать элементы чертежа фрагмента. Чертеж фрагмента детали задается в базовой системе координат, т. е. относительно такой системы координат, которая определяет положение детали относительно других деталей при ее работе в электрической машине. При составлении сборочного чертежа сопрягаются системы координат деталей друг с другом. За оси координат принимают осевые линии отверстий и валов, оси симметрии и т. п. Например, ось координат подшипникового щита проходит вдоль оси вращения машины, а другая - по поверхности замка служит измерительной и сборочной базой подшипникового щита.

Для описания чертежа фрагмента используют чертежные примитивы – прямые линии, точки, дуги. Кроме того, при программировании фрагментов широко применяют команды аффинного
преобразования, позволяющие перемещать какой-либо фрагмент, поворачивать его на некоторый угол, изображать его в увеличенном или уменьшенном масштабе, строить новый элемент, симметричный данному.

В состав подсистемы технологической подготовки производства электрических машин должны входить следующие пакеты прикладных программ (ППТГ):

— обеспечения технологичности конструкции, позволяющие анализировать технологические возможности производства;

— проектирования технологических процессов изготовления машины и подготовки управляющих программ для оборудования с ЧПУ: токарных, фрезерных и электроэрозионных станков;

— конструирование средств технологического оснащения для производства специального мерительного (скобы, пробки, штихмассы) и режущего (сверла, фрезы) инструмента, а также вырубных и гибочных штампов.

Пакеты прикладных программ технологической подготовки производства должны обеспечивать:

— ввод исходных данных непосредственно с конструкторских и технических документов;

— визуальный, по возможности графический контроль исходных данных;

— корректировку исходных данных и справочной информации

— автоматический вывод на графические устройства чертежей технологической оснастки;

— проведение необходимых конструкторских и технологических расчетов.

Математические модели технологической подготовки производства должны разрабатываться на единой методологической основе с максимальным использованием унифицированных, типовых и стандартных решений с учетом принципа единства информационного и лингвистического обеспечений.

Математические модели технологической подготовки производства должны включать формализованное описание:

— конструкторской и технологической документации;

— средств технологической оснастки и технологического оборудования;

— нормативно-справочных материалов.

В настоящее время развитие САПР осуществляется на пути создания экспертных систем. В рамках исследования по искусственному интеллекту сформировалось самостоятельное направление — экспертные системы (ЭС) или инженерия знаний. В задачу этого направления входят, в частности, исследование и разработка программ (устройств), использующих знания и процедуры вывода для решения задач, являющихся трудными для людей-экспертов. В основе ЭС лежат программы, предназначенные для представления и применения фактических знаний из специальных областей к решению конкретных задач. ЭС манипулируют знаниями в целях получения удовлетворительного и эффективного решения в узкой предметной области. Это системы которые не только исполняют заданные процедуры, но на основе метапроцедур поиска генерируют решения новых конкретных задач. Как и настоящий человек-эксперт, эти системы используют символическую логику и эвристику (эмпирические правила), чтобы найти решение. И как настоящие эксперты они могут ошибаться, но обладают способностью учиться на своих ошибках.

Интерес к ЭС со стороны пользователей вызван, по крайней мере, тремя причинами. Во-первых, они ориентированы на решение широкого круга задач в неформализованных областях; на приложения, которые до недавнего времени считались малодоступными для вычислительной техники. Во-вторых, с помощью ЭС специалисты, не знающие программирования, могут самостоятельно разрабатывать интересующие их приложения, что позволяет резко расширить сферу использования

вычислительной техники. В-третьих, ЭС при решении практических задач достигают результатов, не уступающих, а иногда и превосходящих возможности людей-экспертов, не оснащенных ЭС.

В настоящее время ЭС применяют в различных областях деятельности. Наибольшее распространение ЭС получили в проектировании интегральных микросхем, в поиске неисправностей, в военных приложениях и автоматизации программирования.

Традиционное программирование в качестве основы для разработки программы использует алгоритм, т. е. формализованное знание. ЭС не отвергают и не заменяют традиционного подхода к программированию, они отличаются от традиционных программ тем, что ориентированы на решение неформализованных задач и обладают следующими особенностями:

— алгоритм решений не известен заранее, а строится самой ЭС с помощью символических рассуждений, базирующихся на эвристических приемах;

— ясность полученных решений, т. е. система «осознает» в терминах пользователя, как она получила решение;

— способность анализа и объяснения своих действий и знаний;

— способность приобретения новых знаний от пользователя-эксперта, не знающего программирования, и изменения, в соответствии с ним, своего поведения;

— обеспечения «дружественного», как правило, естественно-языкового интерфейса с пользователем.

Технологию построения ЭС часто называют инженерией знаний. Как правило, этот процесс требует специфической формы взаимодействия создателя ЭС, которого называют инженером знаний, и одного или нескольких экспертов в некоторой предметной области. Инженер знаний «извлекает» из экспертов процедуры, стратегии, эмпирические правила, которые они используют при решении задач, и встраивают эта знания в экспертную систему, как показано на рис. 12.4.



Рис. 12.4. Структурная схема экспертной системы

Основой ЭС является совокупность знаний, структурированная в целях упрощения процесса принятия решений ЭС. Выделенные знания о предметной области называются базой знаний, тогда как общие знания о нахождении решений задач называются механизмом вывода. Программа, которая работает со знаниями, организованная подобным образом, называется системой, основанной на знаниях.

База знаний ЭС содержит факты (данные) и правила (или другие представления знаний), использующие эти факты как основы для принятия решений. Механизм вывода содержит интерпретатор, определяющий, каким образом применять правила для вывода новых знаний, и диспетчер, устанавливающий порядок применения этих правил.

В современных ЭС чаще всего используют три самых важных метода представления знаний: правила, семантические сети и фреймы.

Правила обеспечивают формальный способ представления рекомендаций, указаний или стратегий. Они часто подходят в тех случаях, когда предметные знания возникают из эмпирических ассоциаций, накопленных за годы работы по решению задач в данной области. Существуют два важных способа использования правил в системе. Один называется прямой цепочкой рассуждений, а другой — обратной цепочкой рассуждений.

Термин «семантическая сеть» применяют для описания метода представления знаний, основанного на сетевой структуре. Семантические сети состоят из точек, называемых узлами, и связывающих их дуг, описывающих отношения между узлами. Узлы в семантической сети соответствуют объектам, концепциям или событиям. Дуги могут быть определены разными методами, зависящими от вида представления знаний.

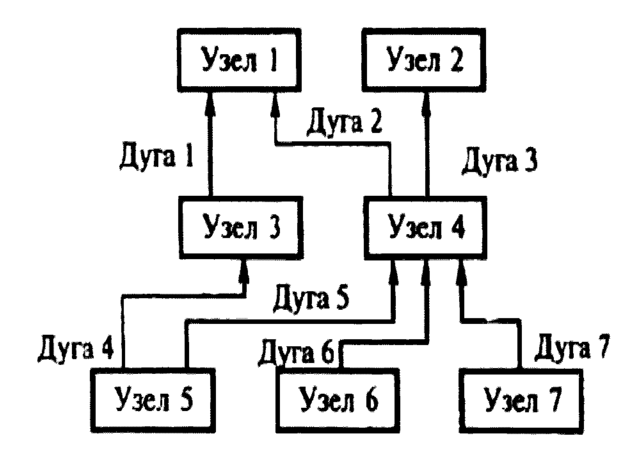


Рис. 12.5. Схема семантической сети

Фрейм относится к специальному методу представления общих концепций и ситуаций. По своей организации он очень похож на семантическую сеть. Фрейм является сетью узлов и отношений, организованных иерархически, где верхние узлы представляют общие понятия, а нижние узлы — более частные случаи этих

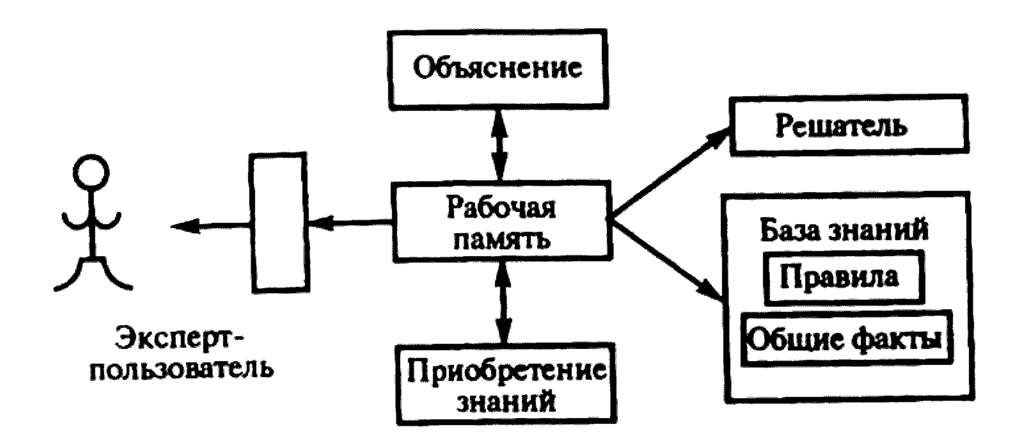


Рис. 12.6. Основные компоненты экспертной системы

понятий. В системе, основанной на фреймах, понятие в каждом узле определяется набором атрибутов и значениями этих атрибутов, которые называют слотами. Каждый слот может быть связан с процедурами (произвольными машинными программами), которые выполняются, когда информация в слотах (значения атрибутов) меняется.

Типичная ЭС состоит из следующих основных компонентов (рис. 12.6): решателя (интерпретатора), рабочей памяти (РП), называемой также базой данных (БД), базы знаний (БЗ), компонентов

База данных предназначена для хранения исходных и промежуточных данных решаемой в текущий момент задачи.

База знаний в ЭС предназначена для хранения долгосрочных данных, описывающих рассматриваемую область (а не текущих данных), и правил, описывающих целесообразные преобразования данных этой области.

Решатель, используя исходные данные из РП и знания из БЗ, формирует такую последовательность правил, которые, будучи применимыми к исходным данным, приводят к решению задачи.

Компонент приобретения знаний автоматизирует процесс наполнения ЭС знаниями, осуществляемый пользователем-экспертом.

Объяснительный компонент объясняет, как система получила решение задачи (или почему она не получила решения) и какие знания она при этом использовала, что облегчает эксперту тестирование системы и повышает доверие пользователя к полученному результату.

Диалоговый компонент ориентирован на организацию дружелюбного общения со всеми категориями пользователей как в ходе решения задач, так и приобретения знаний, объяснения результатов работы.

ЭС, достигая промышленной стадии, обеспечивает высокое качество решений всех задач при минимуме времени и памяти. Обычно процесс

преобразования действующего прототипа в промышленную систему состоит в расширении БЗ и переписывании программ с использованием более эффективных инструментальных средств, например, в перепрограммировании на языках низкого уровня.

Обобщение задач, решаемых ЭС на стадии промышленной системы, позволяет перейти к стадии коммерческой системы — к системе, пригодной не только для собственного использования, но и для продажи различным потребителям.

Проектирование и конструирование электрических машин переживают революционные изменения и будущие книги по проектированию электрических машин должны будут воплотить все успехи в электромашиностроении и новейшие достижения в вычислительной техники.

Приложение 1.

Кривые намагничивания сталей

В связи с некоторым расхождением магнитных характеристик электротехнических сталей одинаковых марок, выпускаемых различными предприятиями, в табл. П 1.1— П 1.17 приводятся усредненные цифры, которые могут быть использованы при учебном проектировании. Для расчетов двигателей для производственных целей рекомендуется пользоваться уточненными кривыми намагничивания конкретной стали, которую предполагается применить для проектируемого двигателя.

Таблица П 1.1. Листовая электротехническая сталь марок 1211, 1212, 1311 (слабо- и среднелегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	153	158	161	164	167
0,5	171	175	179	183	187	191	195	199	203	207
0,6	211	216	221	226	231	236	241	246	251	256
0,7	261	266	271	276	281	287	293	299	306	312
0,8	318	324	330	337	344	352	360	369	378	387
0,9	397	407	417	427	437	447	458	469	480	491
1	502	514	527	541	555	570	585	600	615	631
1,1	647	664	682	701	720	739	859	779	800	821
1,2	843	866	891	918	946	976	1010	1040	1070	1100
1,3	1149	1180	1220	1260	1300	1340	1380	1430	1480	1530
1,4	1580	1640	1710	1780	1860	1950	2050	2150	2260	2380
1,5	2500	2640	2790	2950	3110	3280	3460	3660	3880	4120
1,6	4370	4630	4910	5220	5530	5880	6230	6600	6980	7370
1,7	7780	8200	8630	9070	9630	10100	10600	11 100	11 600	12200
1,8	12800	13400	14200	14600	15200	15900	16600	17300	18000	18800
1,9	19700	20600	21600	22600	23600	24600	25600	26800	28200	29600
2	31000	32500	34300	36500	39000	42000	45500	49500	54500	59500
2,1	65500	72500	80000	88000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000
2,3	224000	232000	240000	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304 000	312000	320 000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000
2,5	384000	392000	400000	408000	416000	424000	432000	440000	448000	456000

Таблица П 1.2 Листовая электротехническая сталь марок 1411, 1412, 1413 (повышенно-легированная)

В, Т л	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/м									
0,2	44	45	47	48	49	50	51	52	54	55
0,3	56	57	58	59	60	61	63	64	65	66
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0.9	166	170	174	179	184	189	194	199	205	211
1	217	223	230	237	241	252	260	269	278	288
1,1	298	309	320	332	345	359	374	390	407	425
1,2	444	465	487	510	535	562	590	620	652	686
1,3	722	760	800	850	900	960	1030	1110	1200	1300
1,4	1410	1530	1660	1810	1970	2140	2320	2510	2710	2920
1,5	3140	3370	3610	3870	4140	4420	4710	5010	5320	5640
1,6	5980	6330	6700	7090	7500	7930	8380	8850	9340	9860
1,7	10100	11000	11600	12300	13000	13700	14500	15300	16200	17100
1,8	18 100	19100	20200	21400	22700	24100	25600	27200	29000	31 100
1,9	33500	36300	39700	43700	48300	53700	59700	66200	73200	80600
2	88300	96100	104000	112000	120000	128000	136000	144000	151000	159000
2,1	167000	175000	183000	191000	199000	207000	215000	223000	231000	239000
2,2	246000	254000	262000	270000	278000	286000	294000	302000	310000	318000
2,3	326000	334000	342000	350000	358000	365000	373000	381000	389000	397000
2.4	405000	413000	421000	429000	437000	445000	—	—	—	—

Таблица П 1.3. Листовая электрическая сталь марок
1511, 1512, 1513 (высоколегированная)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, A/м									
0,4	96	97	98	99	100	102	104	106	108	111
0,5	114	117	120	123	126	129	132	136	140	144
0,6	148	152	156	160	164	168	172	177	182	187
0,7	192	197	202	208	214	220	226	233	240	247
0,8	254	261	268	275	282	289	296	303	310	317
0,9	325	333	341	349	358	367	376	385	394	404
1	414	424	435	446	458	470	483	496	510	524
1,1	538	553	569	586	604	623	643	664	685	707
1,2	730	754	780	810	840	870	900	940	980	1030
1,3	1080	1140	1200	1270	1340	1410	1490	1590	1600	1720
1.4	1940	2060	2200	2340	2500	2700	2920	3140	3370	3600
1,5	3850	4060	4290	4520	4760	5000	5300	5650	6000	6350
1.6	6700	7100	7600	8100	8650	9300	10000	10700	11400	12200
1,7	13000	14000	15000	16000	17000	18000	19000	20000	21000	22000
1,8	23000	24000	25000	26000	27000	28000	29000	30000	31200	32500
1,9	34000	35500	37000	38500	40500	42500	45000	51000	57000	63000
2	70000	77000	84500	92000	100000	108000	116000	124000	138000	140000
2,1	148000	156000	164000	172000	180000	188000	196000	204000	212000	220000
2,2	228000	236000	244000	252000	260000	268000	276000	284000	292000	300000

Примечание. Для индукции свыше 2,06 Тл кривая намагничивания выражается уравнением $B = 1{,}9140 + 1.256\ H10^{-6}$

Таблица П 1.4. Листовая электротехническая сталь (хладнокатаная) марки 3413

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,6	81	83	85	87	89	91	93	95	97	99
0,7	110	112	114	116	118	120	122	124	126	128
0,8	130	132	134	136	138	140	142	144	146	149
0,9	152	155	158	161	164	167	170	173	176	179
1	182	185	188	192	195	198	201	204	207	210
1,1	213	216	219	222	225	228	231	234	237	240
1,2	243	246	249	252	255	258	261	264	267	271
1,3	275	279	283	287	291	295	300	305	310	315
1,4	320	326	332	338	344	350	358	366	374	382
1,5	390	402	414	426	438	450	464	478	492	506
1.6	520	544	566	588	610	632	665	698	732	766
1,7	800	840	890	940	990	1040	1132	1224	1316	1408
1,8	1500	1542	1700	1922	2144	2366	2S88	2820	3080	3450
1,9	3825	4200	4600	5200	5800	7000	8200	9400	10900	13400
2	16000	20000	25000	30000	—	—	—	—	—	—

Таблица П 1.5. Основная кривая намагничивания (сталь 2013)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1	ПО	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,3	620	670	780	890	1000	ИЗО	1240	1350	1460	1580
1,6	1700	1860	2020	2180	2340	2500	2700	2800	3000	3200
1,7	3400	3700	4000	4300	4700	5000	5400	5800	6200	6600
1,8	7000	7500	8000	8500	9200	10000	10600	11 200	11 800	12400
1,9	13000	13600	14200	14 800	15600	16500	17300	18100	18900	19800
2	20700	22600	24400	26300	28100	30000	36000	42000	48000	54000
2,1	60000	67000	74000	81000	88000	95000	102000	109000	116000	123000
2.2	130000	138000	146000	154000	162000	170000	178000	186000	194000	202000
2,3	210000	218000	226000	234000	242000	250000	258000	266000	274000	282000
2,4	290000	298000	306000	314000	322000	330000	338000	346000	354000	362000

Таблица П 1.6 Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей (сталь 2013)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0.8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1.1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1.1	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1.8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1.9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблица П 1.6 Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей (сталь 2013

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0.8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1.1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1.1	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1.8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1.9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

Таблица П 1.7. Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей (сталь 2013)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	!50
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1.2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1.3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1.6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11 500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15 100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21 400

Таблица П 18. Основная кривая намагничивания (стали 2212, 2214 и 2312)

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0.04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1	240	24«	252	258	264	270	276	282	288	294
1.1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1000	1060	1120	1180	1240	1300	1360	1420	1480	1540
1,5	1600	1750	1900	2050	2200	2350	2500	2700	2900	3100
1,6	3400	3600.	3800	4100	4400	4700	5300	5900	6500	7100
1,7	7700	8200	8900	9400	10000	10600	11 100	11 700	12200	12800
1,8	13400	14000	14600	15200	15800	16400	17000	17600	18200	18800
1,9	19400	20000	21800	23700	25700	27800	30000	32200	34400	36600
2	38800	41000	43200	45400	47600	49800	52000	54500	57500	60500
2.1	65500	72500	80000	88000	96000	104000	112000	120000	128000	136000
2,2	144000	152000	160000	168000	176000	184000	192000	200000	208000	216000
2,3	224000	232000	240000	248000	256000	264000	272000	280000	288000	296000
2,4	304000	312000	320000	328000	336000	344000	352000	360000	368000	376000

Таблица П 1.9. Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей (стали 2212, 2214, 2312)

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/м									
0,4	89	91	93	94	96	98	100	102	104	106
0,5	108	110	113	115	118	120	122	124	126	128
0,6	131	134	136	139	141	144	147	150	153	156
0,7	159	162	166	169	172	176	180	183	186	190
0,8	194	198	201	204	208	212	216	220	223	227
0,9	231	235	239	243	248	252	255	260	265	269
1	274	279	284	289	295	300	305	311	318	323
1,1	332	338	344	351	357	367	374	382	390	398
1,2	410	418	426	435	444	455	466	475	487	498
1,3	509	521	533	546	558	572	585	600	618	635
1,4	656	675	695	717	740	763	789	815	843	870
1,5	905	934	965	1000	1040	1090	1130	1190	1240	1290
1,6	1370	1440	1520	1590	1660	1720	1820	1910	2010	2100
1,7	2180	2310	2410	2550	2610	2720	2840	2980	3130	3290
1,8	3460	3630	3800	3970	4140	4301	4490	4670	4850	5040
1.9	5220	5600	6000	6400	6900	7400	7900	8500	9100	9700
2	10400	11 100	11 800	12500	13300	14100	14900	15800	16700	17600

Таблица П. 1.10 Кривая для зубцов асинхронных двигателей (стали 2212, 2214 и 2312)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	140	143	146	149	152	155	158	161	164	171
0,5	174	177	180	184	186	190	192	196	198	202
0,6	204	209	213	216	221	224	229	233	237	241
0,7	245	249	253	257	262	267	272	277	282	287
0.8	292	297	302	306	311	316	322	326	331	337
0,9	342	347	353	360	366	372	379	384	390	396
1	403	409	417	425	433	440	450	460	470	477
1,1	488	497	509	517	527	537	547	559	570	582
1,2	593	602	613	626	638	651	663	677	695	710
1.3	724	738	755	770	790	804	820	840	857	879
1.4	897	917	936	955	977	1000	1020	1040	1060	1090
1,5	1120	1150	1170	1210	1240	1270	1310	1330	1370	1410
1,6	1450	1490	1530	1560	1610	1650	1690	1750	1790	1840
1,7	1900	1940	2000	2070	2140	2220	2300	2380	2500	2600
1,8	2700	2800	2920	3050	3220	3330	3490	3610	3710	4000
1,9	4160	4350	4600	4800	5030	5330	5430	5790	6130	6420
2	6750	7170	7400	7790	8150	8520	9000	9400	9750	10200
2.1	10600	11000	11500	12100	12600	13000	13500	14100	14700	15400
2,2	15900	16500	17300	17800	18500	19100	19600	20300	21 100	22000
2,3	23100	24300	25500	26800	28 100	29500	30900	32400	33900	36400

Таблица П 1.11. Основная кривая намагничивания (сталь 2412)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	305	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	399	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1000	1070	1150
1,4	1230	1320	1420	1520	1630	1750	1870	2010	2160	2320
1,5	2500	2680	2870	3080	3300	3540	3800	4090	4380	4700
1,6	5000	5380	5760	6200	6650	7120	7650	8200	8800	9400
1,7	10000	10500	11000	11 500	12000	12500	13 100	13700	14300	14900
1,8	15600	16200	16800	17500	18300	19100	20000	20900	21 900	22900
1,9	23900	25000	26200	27400	28700	30000	32000	36000	42000	50000
2	59000	68000	77000	86000	95000	104000	113000	122000	131 000	140000
2,1	149000	158000	167000	176000	185000	194000	203000	212000	221 000	230000
2,2	239000	248000	257000	266000	275000	284000	293000	302000	311 000	320000
2,3	329000	333800	347000	356000	365000	374000	383000	392000	401 000	410000
2,4	419000	428000	437000	446000	455000	464000	473000	482000	491000	500000

Таблица П 1.12. Кривая намагничивания для ярма асинхронных двигателей (сталь 2412)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	48	48	49	50	51	51	52	52	53	54
0,5	55	56	56	57	58	59	60	61	61	62
0,6	63	64	65	66	67	68	69	69	70	71
0,7	72	72	73	74	75	76	76	77	78	79
0,8	81	82	83	84	85	87	88	90	92	94
0,9	96	98	100	102	104	105	107	109	112	114
1	116	118	121	124	126	129	132	136	139	143
1.1	146	150	154	158	162	167	172	176	182	188
1,2	192	198	204	210	216	222	230	238	246	260
1,3	272	288	300	316	330	340	358	370	386	399
1,4	410	440	460	490	530	570	610	660	710	770
1,5	820	890	960	1030	1100	1170	1230	1310	1400	1480
1,6	1560	1640	1730	1820	1920	2000	2100	2260	2440	2600
1,7	2800	2960	3100	3260	3400	3580	3740	3900	4100	4300
1,8	4500	4700	5000	5300	5500	5800	6100	6400	6800	7200
1,9	7600	8000	8500	9100	9700	10300	11 100	11900	13 100	14200
2	16000	18000	20000	22000	23800	25500	27600	29600	31500	33800

Таблица П 1.13 Кривая намагничивания для зубцов асинхронных двигателей (сталь 2412)

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/м									
0,4	72	73	74	75	77	78	79	80	81	82
0,5	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
0,6	93	94	95	96	97	98	99	101	102	104
0,7	105	106	108	110	111	113	115	117	118	120
0,8	122	124	126	128	130	132	134	136	138	140
0,9	142	144	147	149	151	155	158	160	163	165
1	168	171	175	177	180	184	188	191	196	200
1,1	204	207	212	216	222	227	232	237	242	247
1,2	254	259	265	272	277	284	291	298	307	316
1,3	323	333	341	351	361	372	383	394	404	421
1,4	425	432	461	480	497	518	537	554	573	596
1,5	622	644	673	700	728	756	795	828	859	890
1,6	932	976	1020	1070	1130	1180	1260	1350	1440	1520
1,7	1630	1740	1870	2020	2130	2300	2450	2630	2830	3040
1,8	3190	3410	3590	3830	4100	4400	4600	4800	5100	5400
1.9	5700	5900	6300	6600	6900	7200	7700	8100	8300	8700
2	9200	9700	10000	10500	10900	11400	12000	12700	13 100	13700
2,1	14200	15000	15800	16500	17200	17900	18700	19800	20600	21 600
2,2	22600	23700	24600	26100	26900	28700	30000	31400	33200	35400
2,3	37600	39900	42200	44600	47000	49500	52000	54600	57200	59800

Таблица П 1.14. Листовая сталь (Ст3) толщиной 1-2 мм (для полюсов)

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,1	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,2	140	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,3	180	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,4	210	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,5	250	—	—	—	—	275	—	—	—	—
0,6	295	—	—	—	—	320	—	—	—	—
0,7	345	—	—	—	—	375	—	—	—	—
0,8	405	—	—	—	—	440	—	—	—	—
0,9	480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
1	570	582	595	607	615	630	642	655	665	680
1,1	690	703	720	731	748	760	775	790	808	825
1,2	845	860	880	900	920	940	960	992	1015	1045
1,3	1080	1112	1145	1175	1220	1260	1300	1350	1393	1450
1,4	1490	1530	1595	1645	1700	1750	1835	1920	2010	2110
1,5	2270	2450	2560	2710	2880	3050	3200	3400	3650	3750
1.6	4000	4250	4500	4750	5000	5250	5580	5950	6230	6600
1,7	7050	7530	7950	8400	8850	9320	9800	10300	10800	11400
1,8	11900	12400	13000	13500	14100	14800	15600	16200	17000	17800
1.9	18800	19700	20700	21 500	22600	23500	24500	25600	26500	27500
2	29000	30200	31500	32800	34200	36100	38000	—	—	—

Таблица П 1.15. Литая сталь, толстые листы (Ст3), поковки

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/м									
0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	539	603	613	623	632	642	652	662	672
0,8	682	639	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1	924	938	953	969	986	1004	1022	1039	1056	1073
1.1	1090	1108	1127	1147	1167	1187	1207	1227	1248	1269
1,2	1290	1315	1340	1370	1400	1430	1460	1490	1520	1555
1,3	1590	1630	1670	1720	1760	1810	1860	1920	1970	2030
1,4	2090	2160	2230	2300	2370	2440	2530	2620	2710	2800
1,5	2890	2990	3100	3210	3320	3430	3560	3700	3830	3960
1,6	4100	4250	4400	4550	470(1	4870	5000	5150	5300	5500

Таблица П1.16. Кривая намагничивания для полюсов (сталь 3411)

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	Н, А/м									
1	170	170	180	185	190	190	200	200	210	210
1,1	220	220	230	235	240	240	250	260	260	270
1,2	280	290	300	310	320	320	330	340	350	360
1,3	370	380	400	410	420	430	450	460	470	480
1,4	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680
1,5	700	730	760	790	820	850	880	910	940	970
1,6	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900
1,7	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2800	3100	3400	3700
1,8	4000	4300	4600	5000	5400	5900	6500	7100	7800	8500
1,9	9200	10000	11 200	13000	15500	19000	22500	26000	30000	35000
2	40000	45000	50000	55000	60000	—	—	—	—	—

Таблица П 1.17. Удельные потери листовой электротехнической стали при В = 1 Тл и f = 50 Гц

Марка стали	1211	1212	1311	1411	1412	1413
Толщина, мм,	1 0,5	1 0,5	0,5	0,5 0,35	0,5 0,35	0,5 0,35
$p_{1,0\ 50}$, Вт/кг	5,8 3,3	5,4 3,1	2,5	2 1,6	1,8 1,4	1,55 1,35
Марка стали	1511	1512	1513	3413	2011	
Толщина, мм	0,5 0,35	0,5 0,35	0,5 0,35	0,5 0,35	0,65 0,5	
$p_{1,0\ 50}$, Вт/кг	1,55 1,35	1,4 1,2	1,25 1,05	0,8 0.6	3,8 3,5	
Марка стали	2012	2013	2212	2214	2312	2412
Толщина, мм	0,65 0,5	0,65 0,5	0,65 0,5	0,5	0,65 0,5	0,5 0,35
$p_{1,0\ 50}$, Вт/кг	3,6 2,9	3,1 2,5	2,6 2,2	2	2,4 1,75	1,3 1,15

Приложение 2. Кривые намагничивания[1] для зубцовых зон с учетом ответвления потока в пазы

B'_Z — расчетная индукция в зубцах, Тл;

$k_{nx} = \dfrac{S_{nx}}{S_{Zx}} = \dfrac{b_{nx} l_\delta}{b_{zx} l_{ct} k_c}$ — коэффициент, определяющий отношение площадей поперечных сечений паза и зубца на высоте h_{Zx}.

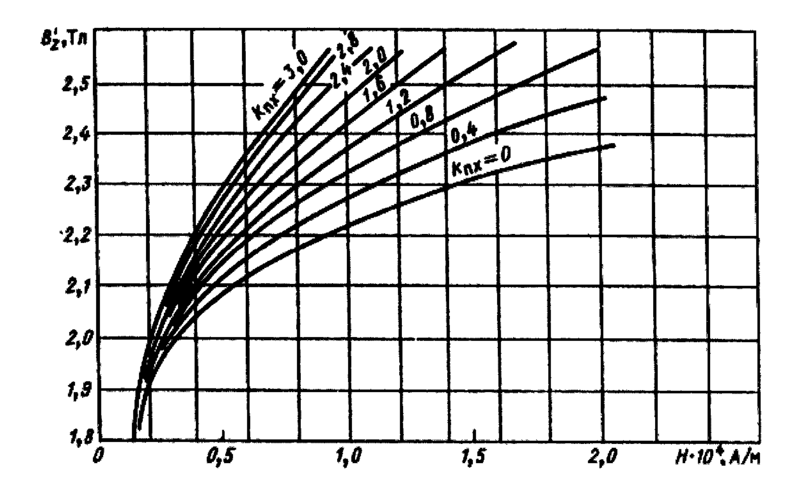


Рис. П2.1. Кривые намагничивания стали марки 2013
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон асинхронных двигателей)

[1] См. приложение 1

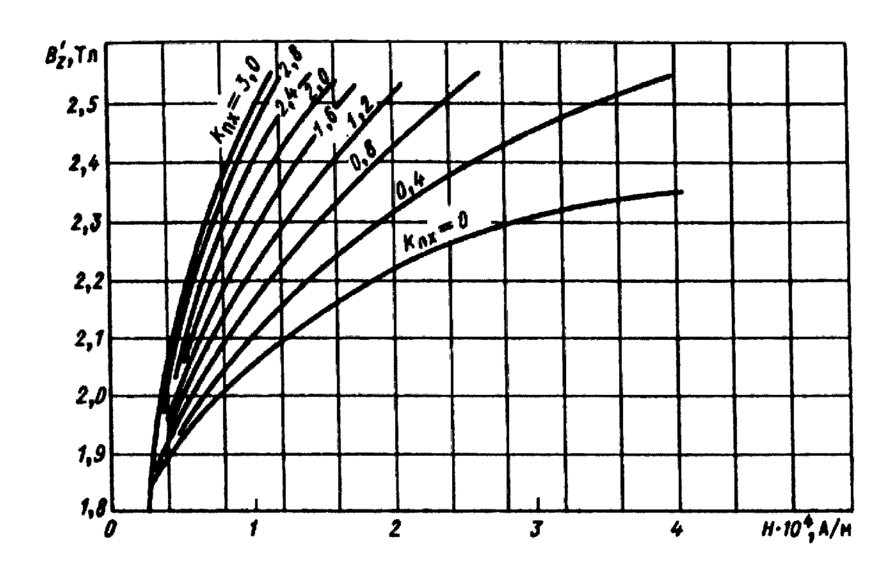


Рис. П2.2 Кривые намагничивания стали марок 2211, 2312, 2411
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон асинхронных двигателей)

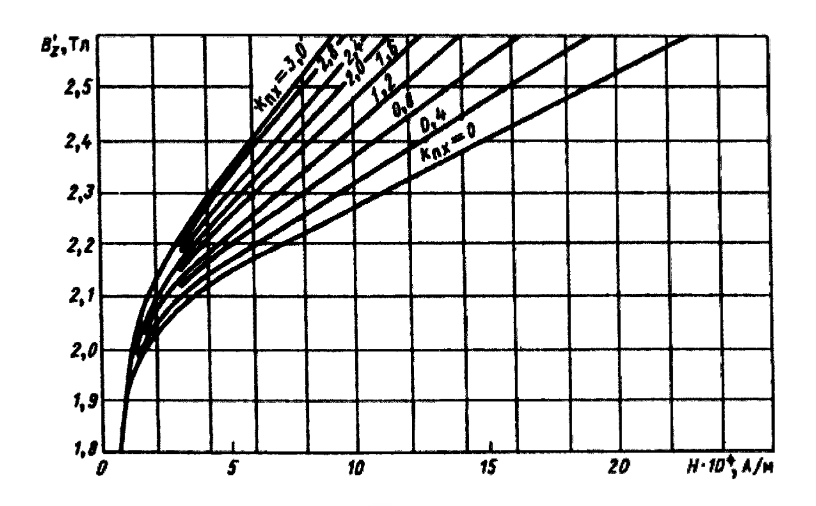


Рис. П2.3. Кривые намагничивания стали марки 2013
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

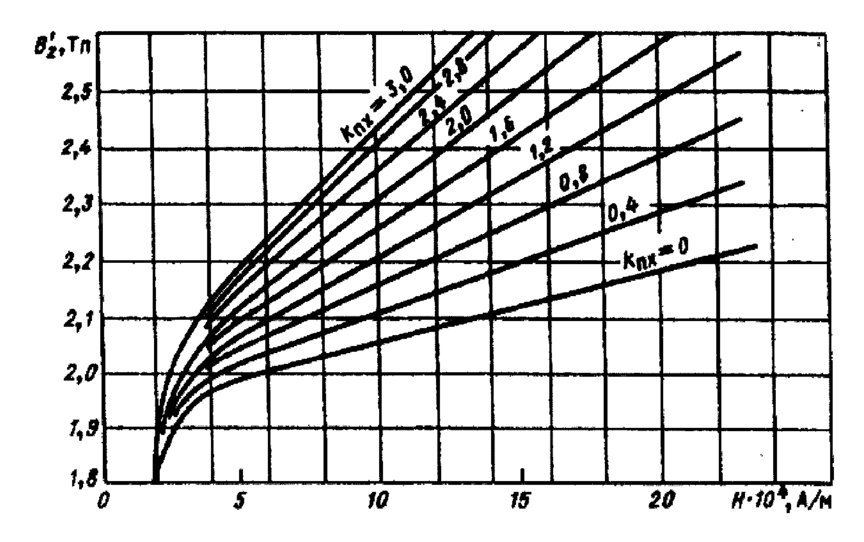


Рис. П2.4. Кривые намагничивания стали марок 2211, 2312, 2411
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

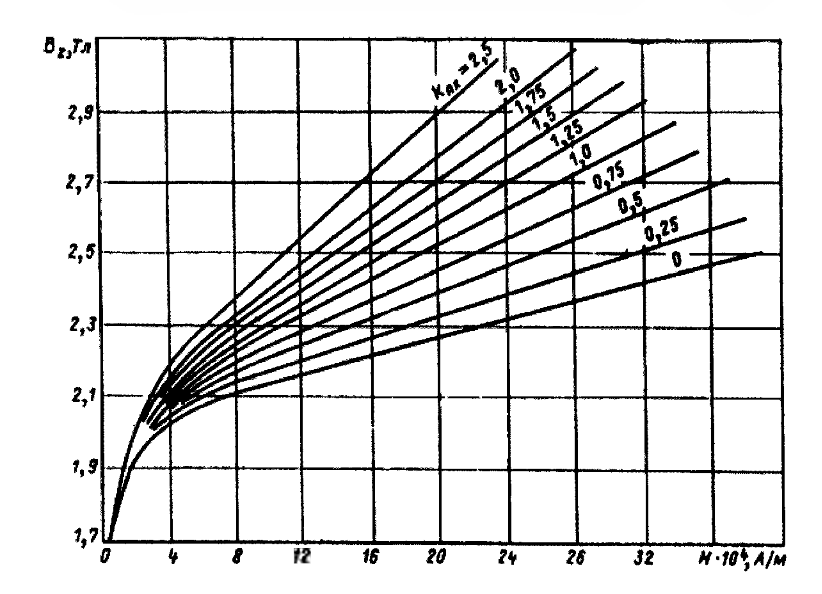


Рис. П2.5. Кривые намагничивания стали марок 1211, 1212, 1311
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

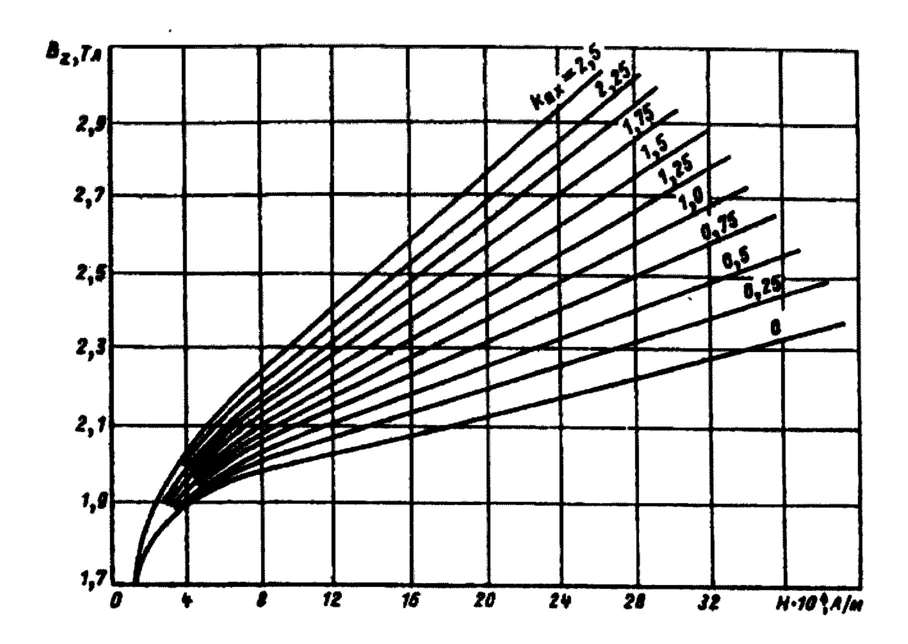


Рис. П2.6. Кривые намагничивания стали марки 1411
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

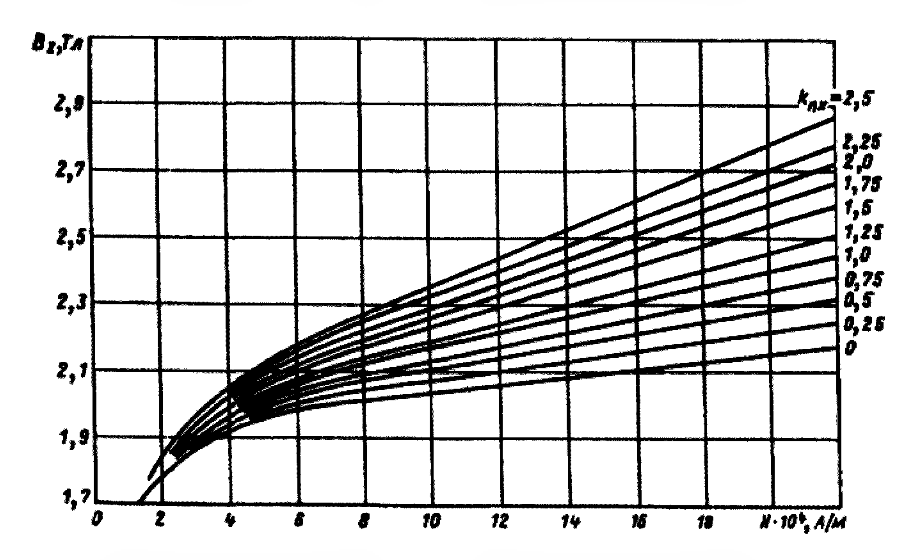


Рис. П2.7. Кривые намагничивания стали марок 1511, 1512, 1513
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

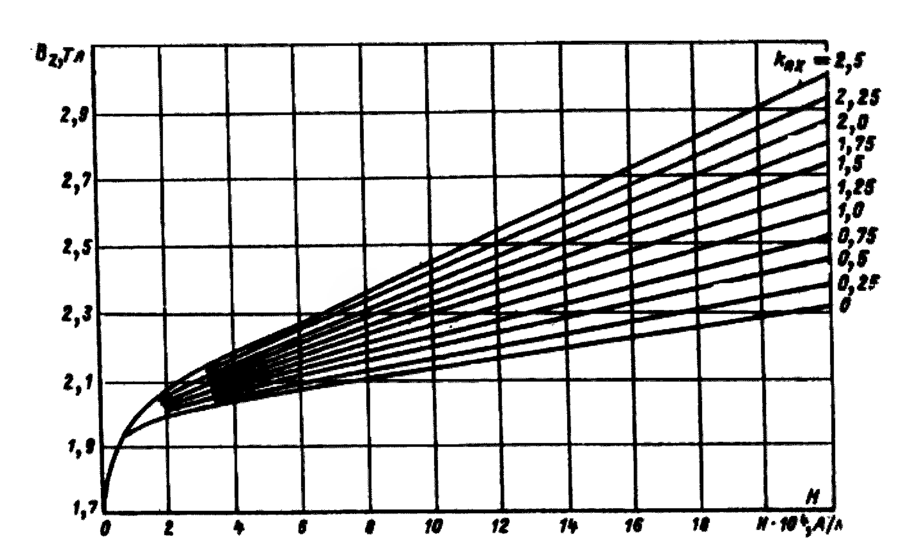


Рис. П2.8. Кривые намагничивания стали марки 3413
(к определению магнитного напряжения зубцовых зон машин постоянного тока и синхронных)

Приложение 3. Обмоточные провода. Ленты и шины

Таблица П3.1. **Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155**

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм^2	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2
0,08	0,1	0,00502
0,09	0,11	0,00636
0,1	0,122	0,00785
0,112	0,134	0,00985
0,125	0,147	0,01227
(0,132)	0,154	0,01368
0,14	0,162	0,01539
0,15	0,18	0,01767
0,16	0,19	0,0201
0,17	0,2	0,0227
0,18	0,21	0,0255
(0,19)	0,22	0,0284
0,2	0,23	0,0314
(0,212)	0,242	0,0353
0,224	0,259	0,0394
(0,236)	0,271	0,0437
0,25	0,285	0,0491
(0,265)	0,3	0,0552
0,28	0,315	0,0616
(0,3)	0,335	0,0707
0,315	0,35	0,0779
0,335	0,37	0,0881
0,355	0,395	0,099
0,375	0,415	0,1104
0,4	0,44	0,1257
0,425	0,565	0,1419
0,45	0,49	0,159
(0,475)	0,515	0,1772
0,5	0,545	0,1963
(0,53)	0,585	0,221
0,56	0,615	0,246
0,6	0,655	0,283
0,63	0,69	0,312
(0,67)	0,73	0,353
0,71	0,77	0,396
0,75	0,815	0,442
0,8	0,865	0,503
0,85	0,915	0,567
0,9	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1	1,08	0,785
1,06	1,14	0,883
1,12	1,2	0,985
1,18	1,26	1,094
1,25	1,33	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,5	1,585	1,767
1,6	1,685	2,011
1,7	1,785	2,27
1,8	1,895	2,54
1,9	1,995	2,83
2	2,095	3,14
2,12	2,22	3,53
2,24	2,34	3,94
2,36	2,46	4,36
2,5	2,6	4,91

Таблица П3.2. **Размеры и площадь поперечного сечения прямоугольной проволоки**

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм																	
	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12
	Расчетное сечение проволоки, мм^2																	
2	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	—	—	—	—	—	—	—
2,12	1,559	—	1,734	—	1,905	—	2,16	—	2,435	—	2,753	—	—	—	—	—	—	—
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,16	1,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	—	—	—	—	—
2,36	1,751	—	1,95	—	2,145	—	2,429	—	2,735	—	3,089	—	3,561	—	—	—	—	—
2,5	1,863	1,97	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,91	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	—	—	—
2,65	1,983	—	2,211	—	2,435	—	2,753	—	3,098	—	3,495	—	4,025	—	4,407	—	—	—
2,8	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	—
3	2,263	—	2,526	—	2,785	—	3,145	—	3,535	—	3,985	—	4,585	—	5,038	—	5,638	—
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,51	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	2,543	—	2,841	—	3,135	—	3,537	—	3,973	—	4,475	—	5,145	—	5,667	—	6,337	—
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,11	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	2,863	—	3,201	—	3,535	—	3,985	—	4,473	—	5,035	—	5,785	—	6,387	—	7,137	—
4	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	3,263	—	3,551	—	4,035	—	4,545	—	5,098	—	5,735	—	6,585	—	7,287	—	8,137	—
4,5	3,463	3,67	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,41	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177
4,75	3,663	—	4,101	—	4,535	—	5,105	—	5,723	—	6,435	—	7,385	—	8,188	—	9,137	—
5	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,3	4,103	—	4,596	—	5,085	—	5,721	—	6,41	—	7,205	—	8,265	—	9,177	—	10,24	—
5,6	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	8,101	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6	4,663	—	5,226	—	5,785	—	6,505	—	7,285	—	8,185	—	9,385	—	10,44	—	11,64	—
6,3	4,90	5,2	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,66	9,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,7	—	—	5,856	—	6,485	—	7,289	—	8,16	—	9,165	—	10,51	—	11,7	—	13,04	—
7,1	—	—	6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,66	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,5	—	—	—	—	7,285	—	8,185	—	9,16	—	10,29	—	11,79	—	13,14	—	14,64	—
8	—	—	—	—	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,6
8,5	—	—	—	—	—	—	9,305	—	10,41	—	11,69	—	13,39	—	14,94	—	16,64	—
9	—	—	—	—	—	—	9,865	10,41	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,5	—	—	—	—	—	—	—	—	11,66	—	13,09	—	14,99	—	16,74	—	18,64	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,63	—	16,75	—	18,72	—	20,84	—
11,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,47	16,59	17,71	18,68	19,8	20,92	22,04	23,38
11,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	18,67	—	20,88	—	23,24	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14

Продолжение табл. П3.2

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм																
	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6
	Расчетное сечение проволоки, мм²																
2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,24	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,36	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,15	6,693	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,35	7,141	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,55	7,589	7,829	8,326	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,75	8,037	—	8,826	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	8,897	8,891	9,451	10,65	10,85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	9,157	—	10,08	—	11,35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,5	9,717	10,07	10,7	11,38	12,05	12,95	13,63	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	10,28	—	11,33	—	12,75	—	14,41	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	10,84	11,25	11,95	12,7	13,45	14,45	15,2	16,2	17,2	—	—	—	—	—	—	—	—
5,3	11,51	—	12,7	—	14,29	—	16,15	—	18,27	—	—	—	—	—	—	—	—
5,6	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	—	—	—	—	—	—
6	13,08	—	14,45	—	16,25	—	18,35	—	20,75	—	23,14	—	—	—	—	—	—
6,3	13,75	14,32	15,2	16,15	17,09	18,35	19,3	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	—	—	—	—
6,7	14,65	—	16,2	—	18,21	—	20,56	—	23,24	—	25,94	—	29,29	—	—	—	—
7,1	15,54	16,21	17,2	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	—	—
7,5	16,44	—	18,2	—	20,45	—	23,08	—	26,08	—	29,14	—	32,89	—	36,64	—	—
8	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,5	18,68	—	20,7	—	23,25	—	26,23	—	29,63	—	33,14	—	37,39	—	41,64	—	46,74
9	19,8	20,69	21,95	23,3	24,65	26,54	27,8	29,6	31,4	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,5	20,92	—	23,2	—	26,05	—	29,38	—	33,18	—	37,14	—	41,89	—	46,64	—	52,34
10	22,04	23,05	25,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,6	23,38	—	25,95	—	29,13	—	32,84	—	37,08	—	41,54	—	46,84	—	52,14	—	58,5
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,79	49,54	52,34	55,14	58,5	61,86
11,8	26,07	—	28,95	—	32,49	—	36,62	—	41,24	—	46,34	—	52,24	—	52,14	—	65,22
12,5	27,64	24,95	30,7	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Продолжение табл. П3.2

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм												
	3,28	3,35	3,53	3,55	3,75	3,8	4	4,1	4,25	4,4	4,5	4,7	4,75
	Расчетное сечение проволоки, мм^2												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,2	—	36,97	—	39,21	41,14	—	43,94	—	46,74	—	49,54	—	52,34
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,8	—	—	—	41,34	—	—	46,34	—	—	—	52,24	—	—
12,5	—	41,35	—	43,83	46,02	—	49,14	—	52,27	—	55,39	—	58,52
13,2	—	—	—	46,31	—	—	51,94	—	—	—	58,54	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	—	46,35	—	49,15	51,95	—	55,14	—	58,64	—	62,14	—	66,64
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15	—	—	—	52,7	—	—	59,14	—	—	—	66,64	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	53,05	—	56,25	59,14	—	63,14	—	67,14	—	71,14	—	75,14
16,8	54,62	—	58,82	—	—	63,36	—	68,02	—	73,06	—	78,1	—
18	58,56	—	63,06	—	—	67,92	—	72,94	—	78,34	—	83,74	—
19,5	63,48	—	68,35	—	—	73,62	—	79,09	—	84,94	—	90,79	—
20	—	—	—	—	—	—	79,52	—	—	—	—	—	—
22	71,68	—	77,18	—	—	83,12	—	89,34	—	95,94	—	102,54	—
25	81,52	—	87,77	—	—	94,52	99,52	101,64	—	109,14	—	116,4	—
26,3	—	—	92,36	—	—	99,46	—	106,97	—	114,86	—	122,75	—
28	—	—	—	—	—	105,92	111,94	113,94	—	122,34	—	130,74	—
30	—	—	—	—	—	113,52	119,52	122,14	—	131,14	—	140,14	—
32	—	—	—	—	—	—	—	130,34	—	139,94	—	149,54	—
35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	153,14	—	163,64	—

Продолжение табл. П3.2

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм												
	5	5,1	5,3	5,5	5,6	6	6,5	7	8	9	10	11	12,5
	Расчетное сечение проволоки, мм^2												
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	96,34	—	—	—
11,2	55,14	—	58,50	—	61,86	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	103,64	—	—	—
11,8	58,14	—	—	—	65,22	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	61,64	—	65,39	—	69,14	—	—	—	99,14	111,64	124,14	136,66	155,41
13,2	65,14	—	—	—	73,06	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	—	—	—	—	—	—	—	93,64	107,14	120,64	—	—	—
14	69,14	—	73,34	—	77,54	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	93,39	100,64	115,14	129,64	—	—	—
15	74,14	—	—	—	83,14	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	—	—	—	—	—	—	100,54	108,34	123,94	139,54	154,14	—	—
16	79,14	—	83,94	—	88,74	95,14	—	—	127,14	—	—	—	—
16,8	—	84,82	—	91,54	—	99,94	108,34	116,74	133,54	—	—	—	—
18	—	90,94	—	98,14	—	107,14	116,14	125,14	143,14	—	—	—	—
19,5	—	98,59	—	106,39	—	116,14	125,89	135,64	155,14	—	—	—	—
20	99,14	—	—	—	—	119,14	—	—	159,14	—	—	—	—
22	—	111,34	—	120,14	—	131,14	142,14	153,14	—	—	—	—	—
25	124,14	126,64	—	136,64	—	149,14	161,64	174,14	—	—	—	—	—
26,3	—	133,27	—	143,79	—	158,94	170,09	183,24	—	—	—	—	—
28	—	141,94	—	153,14	—	167,14	181,14	195,14	—	—	—	—	—
30	149,14	152,14	—	164,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	—	162,34	—	175,14	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица П3.3. **Максимальная толщина изоляции обмоточных проводов**

Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции при диаметрах голого провода d, мм							
	0,05—0,09	0,1—0,19	0,2—0,25	0,265—0,3	0,315—0,355	0,375—0,5	0,53—0,71	0,75—0,95
ПБД	—	—	0,19	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
АПБД	—	—	—	—	—	—	—	—
ПЭЛБО	—	—	0,125	0,155	0,16	0,165	0,17	0,18
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,07	0,075	0,09	0,1	0,105	0,11	0,115	0,125
ПСД, ПСДК	—	—	—	—	0,23	0,23	0,25	0,25
ПСДТ	—	—	—	—	0,18	0,18	0,19	0,2
ПСДКТ	—	—	—	—	0,14	0,14	0,16	0,16
ПДА	—	—	—	—	—	—	—	—
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВППИ, ПЭТВП	—	—	—	—	—	—	—	—
ППТБО, ППЛБО	—	—	—	—	—	—	—	—

Продолжение табл. П3.3

Марка провода	Двусторонняя толщина изоляции при диаметрах голого провода d, мм					прямоугольного провода при меньшей стороне сечения голого провода, мм		
	1—1,4	1,5—1,6	1,7—2,12	2,24—5	5—5,2	0,85—1,9	2,12—3,75	4—5,6
ПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
АПБД	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,44
ПЭЛБО	0,21	0,21	0,21	—	—	—	—	—
ПЭЛШО, ПЭЛШКО	0,135	0,155	0,155	—	—	—	—	—
ПСД, ПСДК	0,27	0,27	0,27	0,33	0,33	0,27	0,33	0,4
ПСДТ	0,21	0,21	0,23	—	—	—	—	—
ПСДКТ	0,18	0,18	—	—	—	0,22	—	—
ПДА	0,3	0,3	0,3	0,35	0,35	0,4	0,4	0,4
ПЭВП, ПЭМП, ПЭВППИ, ПЭТВП	—	—	—	—	—	0,1—0,12	0,15	—
ППТБО, ППЛБО	—	—	—	—	—	0,45	0,45	0,5

Таблица П3.4. **Номинальные размеры, мм и расчетные сечения, мм², лент**

b	a															
	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,08	1,16	1,25	1,35
8	0,8	1,2	1,6	2	2,4	3,2	4	4,8	5,6	6,4	7,2	—	—	—	—	—
8,6	—	—	—	—	—	—	4,3	5,16	6,02	6,88	7,74	—	—	—	—	—
9,3	—	—	—	—	—	—	4,65	5,58	6,51	7,44	8,37	9,08	—	—	—	—
10	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	9,78	10,6	—	—	—
10,8	—	—	—	—	—	—	5,4	6,48	7,56	8,64	9,72	10,6	11,4	12,2	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	5,8	6,96	8,12	9,28	10,4	11,4	12,3	13,2	14,2	—
12,5	1,25	1,88	2,5	3,13	3,75	5	6,25	7,5	8,75	10	11,3	12,3	13,3	14,2	15,3	16,5
13,5	—	—	—	—	—	—	6,75	8,1	9,45	10,8	12,2	13,3	14,3	15,4	16,5	17,8
14	1,4	2,1	2,8	3,5	4,2	5,6	7	8,4	9,8	11,2	12,6	—	—	—	—	—
14,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14,3	15,4	16,5	17,9	19,2
15,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	15,4	16,6	17,8	19,2	20,7
16	1,6	2,4	3,2	4	4,8	6,4	8	9,6	11,2	12,8	14,4	—	—	—	—	—
16,8	—	—	—	—	—	—	8,4	10,1	11,8	13,4	15,1	16,6	17,9	19,2	20,7	22,3
18	1,8	2,7	3,6	4,5	5,4	7,2	9	10,8	12,6	14,4	16,2	17,8	19,2	20,6	22,2	23,9
19,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19,3	20,8	22,3	24,0	25,9
20	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	—	—	—	—	—
22	2,2	3,3	4,4	5,5	6,6	8,8	11	13,2	15,4	17,6	19,8	21,8	23,5	25,2	27,2	29,3
25	2,5	3,75	5	6,25	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	24,8	26,8	28,7	30,9	33,4
26,3	—	—	—	—	—	—	13,2	15,8	18,4	21	23,7	26,1	28,2	30,2	32,5	35,1
28	2,8	4,2	5,6	7	8,4	11,2	14	16,8	19,6	22,4	25,2	27,8	30	32,2	34,7	37,4
30	3	4,5	6	7,5	9	12	15	18	21	24	27	29,8	32,2	34,5	37,2	40,1
32	3,2	4,8	6,4	8	9,6	12,8	16	19,2	22,4	25,6	28,8	31,8	34,3	36,8	39,7	42,8
35	3,5	5,25	—	—	10,5	—	17,5	—	24,5	28,8	—	34,8	37,6	40,3	43,4	46,9
40	4	6	8	10	12	16	20	24	28	32	36	39,8	43	46,1	49,7	53,6
45	—	6,75	—	—	13,5	—	22,5	—	31,5	36	—	44,8	—	—	55,9	60,4
47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	5	7,5	10	12,5	15	20	25	30	35	40	45	49,8	53,8	57,7	62,2	67,1
55	—	—	—	—	16,5	—	27,5	—	38,5	44	—	54,8	—	—	—	—
60	6	9	12	15	18	24	30	36	42	48	54	59,8	—	—	—	—
65	—	—	—	—	—	—	—	—	45,5	—	—	64,8	—	—	—	—
70	—	—	14	—	21	28	35,3	42	—	56	63	69,8	—	—	—	—
75	—	—	—	—	22,5	30	37,5	45	52,5	60	67,5	74,8	—	—	—	—
80	—	—	16	—	24	32	40	48	—	64	72	79,8	—	—	—	—
90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	72	—	—	—	—	—	—
100	—	—	20	—	—	—	50	—	—	80	—	99,8	—	—	—	—

Продолжение табл. П3.4

b	a															
	1,45	1,5	1,56	1,68	1,81	1,95	2	2,1	2,26	2,44	2,5	2,63	2,83	3	3,28	3,53
8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
9,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
11,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
13,5	19,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
14,5	20,6	—	22,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
15,6	22,2	—	23,8	25,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16	—	23,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
16,8	23,9	—	25,7	27,6	29,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
18	25,7	—	27,6	29,6	31,9	34,3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
19,5	27,9	—	29,9	32,2	34,6	37,2	—	40	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	29,5	—	—	—	—	39,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
22	31,5	—	33,8	36,4	39,1	42,1	—	45,3	48,6	52,4	—	—	—	—	—	—
25	35,8	37	38,5	41,4	44,6	47,9	49,1	51,6	55,4	59,7	61,2	64,3	—	—	—	—
26,3	37,7	—	40,5	43,6	46,9	50,5	—	54,3	58,3	62,8	—	67,7	72,2	—	—	—
28	40,2	—	43,2	46,4	50	53,8	—	57,9	62,2	67	—	72,2	77,5	82,1	—	—
30	43,1	44,5	46,3	49,8	53,6	57,7	59,1	62,1	66,7	71,9	73,7	77,4	83,2	88,1	91,1	—
32	46	—	49,4	53,2	57,2	61,6	—	66,3	71,3	76,8	—	82,7	88,9	94,1	102,7	110,3
35	50,3	—	54,1	58,2	62,7	67,4	—	72,6	78	84,1	—	90,6	97,4	103,1	112,6	120,9
40	57,6	59,5	61,9	66,6	71,7	77,2	79,1	83,1	89,3	96,3	98,7	103,7	111,5	118,1	128,9	138,5
45	64,8	—	69,7	75	80,8	86,9		93,6	100,6	108,5	—	116,9	125,7	133,1	145,3	156,2
47	—	—	—	—	—	—	—	—	—	113,4	—	—	—	—	—	—
50	72,1	74,5	77,5	83,4	89,8	96,7	99,1	104,1	111,9	120,7	123,7	130	139,8	148,1	161,7	173,8
55	—	—	85,3	91,8	98,9	106,4	—	114,6	123,2	132,9	—	142,2	154	163,1	178,1	191,5
60	86,6	—	93,1	100,2	107,9	116,2	—	125,1	134,5	145,1	—	156,3	168,1	178,1	194,5	209,1
65	—	—	100,9	—	—	125,9	—	—	—	157,3	—	169,5	182,3	193,1	210,8	226,8
70	—	—	108,7	—	—	135,7	—	—	—	169,5	—	—	—	208,1	227,3	244,4
75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	—	—	124,3	—	—	155,2	—	—	—	193,9	—	—	—	238,1	—	—
90	—	—	139,9	—	—	174,7	—	—	—	218,3	—	—	—	268,1	—	—
100	—	—	155,5	—	—	194,2	—	—	—	242,7	—	—	—	298,1	—	—

Примечание. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только при обосновании технико-экономической целесообразности.

Таблица П3.5. **Номинальные размеры, мм, и расчетные сечения, мм², шин**

b	*a*																	
	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	8	9	10	11	12,5	14	16	18	20	25	30
16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	175,1	199,1	233,1	255,1	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	199,1	219,1	249,1	279,1	319,1	259,1	399,1	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	199,1	224,1	249,1	274,1	311,6	349,1	399,1	449,1	499,1	624,1	—
30	—	—	—	—	179,1	194,1	209,1	239,1	269,1	299,1	329,1	374,1	419,1	479,1	539,1	599,1	749,1	899,1
32	—	—	—	—	191,1	207,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
35	—	—	174,1	191,6	209,1	226,6	—	279,1	—	349,1	—	436,6	—	—	—	699,1	—	—
40	159,5	179,1	199,1	219,1	239,1	259,1	279,1	319,1	359,1	399,1	439,1	499,1	559,1	639,1	719,1	799,1	999,1	1199,1
45	179,5	201,6	224,1	246,6	269,1	291,6	314,1	359,1	404,1	449,1	494,1	561,6	629,1	719,1	809,1	899,1	—	1349,1
50	199,5	224,1	249,1	274,1	299,1	324,1	349,1	399,1	449,1	499,1	549,1	624,1	699,1	799,1	899,1	999,1	—	—
55	219,5	246,6	274,1	301,1	329,1	256,6	384,1	429,1	494,1	549,1	—	686,6	—	879,1	—	1099,1	—	—
60	239,5	269,1	299,1	329,1	359,1	389,1	439,1	479,1	539,1	599,1	—	749,1	—	959,1	—	1199,1	—	—
65	259,5	291,6	324,1	—	389,1	—	454,1	—	584,1	649,1	—	811,6	—	1039,1	—	—	—	—
70	279,5	314,1	349,1	—	—	—	—	559,1	629,1	699,1	—	874,1	—	1119,1	—	—	—	—
75	—	—	—	—	—	—	—	599,1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
80	319,5	359,1	399,1	—	479,1	—	559,1	639,1	—	799,1	—	999,1	—	—	—	—	—	—
90	359,5	404,1	449,1	—	539,1	—	629,1	719,1	—	899,1	—	1124,1	—	—	—	—	—	—
100	399,5	449,1	499,1	—	599,1	—	699,1	799,1	—	999,1	—	1249,1	—	—	—	—	—	—
120	—	—	—	—	—	—	—	959,1	—	1199,1	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Расчетные сечения указаны с учетом закругления углов.

Таблица П3.6. **Прессованные шины из алюминия марки АДО**

Номинальный размер шины по меньшей стороне, мм	Номинальный размер шины по большей стороне, мм	Площадь поперечного сечения, мм²
4	30	120
4	40	160
4	50	200
4	60	240
5	30	150
5	40	200
5	50	250
5	60	300
6	30	180
6	40	240
6	50	300
6	60	360

Приложение 4. Щетки для электрических машин

Таблица П4.1. **Шкала размеров электрощеток (в миллиметрах),** $b_щ \times l_щ \times h_щ$

Тангенциальный размер $b_щ$	Осевой размер $l_щ$										
	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40	50
4	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	12,5	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	20	20	20	20	—	—	—	—	—
5	—	12,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	20	20	20	20	—	—	—	—	—
	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	32	32	32	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	—	—	—	—
6,3	—	—	20	20	20	—	—	—	—	—	—
	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	32	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—	—
8	—	—	—	20	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	25	25	25	25	25	—	—	—
	—	—	—	32	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	—	—
10	—	—	—	—	25	25	25	—	—	—	—
	—	—	—	—	32	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	—
12,5	—	—	—	—	—	25	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	32	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
16	—	—	—	—	—	—	32	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	40	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
20	—	—	—	—	—	—	—	32	32	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	40	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
25	—	—	—	—	—	—	—	—	40	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64	64
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	40	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50	50
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	64	64
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80
40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	100

Примечание. Щетки шириной 25 мм и выше подразделяются на две.

Таблица П4.2. **Рекомендуемые расчетные параметры и условия работы щеток для электрических машин общего назначения**

Обозначение марок щеток	Наименование группы марок	Переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока, В	Плотность, А/см^2	Скорость, м/с	Давление на щетку, кПа	Преимущественная область применения
Г-20	Угольно-графитные	2,9	15	40	50	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и коллекторные машины переменного тока
Г-21		4,3	5	30	15—100	
Г-22		2,5	10	30	40	
Г3	Графитные	1,9	11	25	20—25	Генераторы и двигатели с облегченными условиями коммутации и контактные кольца
611М		2	12	40	20—25	
6110М		2	15	90	12—22	
ЭГ2А	Электро-графитированные	2,6	10	45	20—25	Генераторы и двигатели со средними и затрудненными условиями коммутации и контактные кольца
ЭГ2АФ		2,2	15	90	15—21	
ЭГ4		2	12	40	15—20	
ЭГ8		2,4	10	40	20—40	
ЭГ14	То же	2,5	11	40	20—40	То же
ЭГ51		2,2	12	60	20—25	
ЭГ61		3	13	60	35—50	
ЭГ71		2,2	12	40	20—25	
ЭГ74		2,7	15	50	17,5—25	
ЭГ74АФ		2,3	15	60	15—21	
ЭГ85		2,3	15	50	17,5—35	
М1	Металлографитные	1,5	15	25	15—20	Низковольтные генераторы и контактные кольца
М3		1,8	12	20	15—20	
М6		1,5	15	25	15—20	
М20		1,4	12	20	15—20	
МГ	То же	0,2	20	20	18—23	То же
МГ2		0,5	20	20	18—23	
МГ4		1,1	15	20	20—25	
МГ64		0,5	25	25	15—20	
МГС0		0,2	20	20	18—23	
МГС5		2	15	35	20—25	

Примечание: 1. при работе электрических машин в условиях повышенной вибрации и больших частот вращения коллектора (свыше 1500 об/мин) давление на щетку может быть повышено до 50 кПа.

2. Плотность тока щетки должна выбираться в зависимости от частоты вращения коллектора и условий коммутации каждого конкретного типа электрической машины.

3. Коэффициент трения щеток о коллектор принимается равным 0,25 для всех марок щеток.

Приложение 5. Подшипники качения

Таблица П5.1. **Шарикоподшипники радиальные однорядные (рис. 8.18). Обозначения см. § 8.4**

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
Легкая серия							
200	10	30	9	1	4600	2610	20 000
201	12	32	10	1	4700	2650	20 000
202	15	35	11	1	5850	3470	16 000
203	17	40	12	1	7400	4400	16 000
204	20	47	14	1,5	9800	6200	12 500
205	25	52	15	1,5	10 800	6950	10 000

206	30	62	16	1,5	15 000	10 000	10 000
207	35	72	17	2	19 700	13 600	8000
208	40	80	18	2	25 100	17 800	6300
209	45	85	19	2	25 200	17 800	6300
210	50	90	20	2	27 000	19 800	6300
211	55	100	21	2,5	33 400	25 100	5000
212	60	110	22	2,5	40 400	30 900	5000
213	65	120	23	2,5	44 000	34 000	5000
214	70	125	24	2,5	48 000	37 400	4000
215	75	130	25	2,5	51 000	41 000	4000
216	80	140	26	3	56 000	44 500	4000
217	85	150	28	3	64 000	53 100	4000
218	90	160	30	3	74 000	60 500	3150
219	95	170	32	3,5	84 000	69 500	3150
220	100	180	34	3,5	94 000	79 000	3150
Средняя серия							
300	10	35	11	1	6250	3750	20 000
301	12	37	12	1,5	7500	4640	16 000
302	15	42	123	1,5	8750	5400	16 000
303	17	47	14	1,5	10 700	6670	12 500
304	20	52	15	2	12 250	7780	12 500
305	25	62	17	2	17 250	11 400	10 000
306	30	72	19	2	21 600	14 800	8000
307	35	80	21	2,5	25 700	17 550	8000
308	40	90	23	2,5	31 300	22 200	6300
309	45	100	25	2,5	37 000	26 200	6300
310	50	110	27	3	47 500	35 600	5000
311	55	120	29	3	55 000	41 800	5000
312	60	130	31	3,5	63 000	48 400	4000
313	65	140	33	3,5	71 300	55 600	4000
314	70	150	35	3,5	80 200	63 200	4000
315	75	160	37	3,5	87 500	71 500	3150
316	80	170	39	3,5	94 600	80 200	3150
317	85	180	41	4	102 000	89 400	3150
318	90	190	43	4	110 000	99 000	3150
319	95	200	45	4	117 000	109 000	2500
320	100	215	47	4	134 000	130 000	2500
321	105	225	49	4	141 000	142 000	2500
322	110	240	50	4	158 000	167 000	2500
324	120	260	55	4	167 000	180 000	2000
326	130	280	58	5	176 000	194 000	1600
Тяжелая серия							
403	17	62	17	2	17 500	11 900	10 000
405	25	80	21	2,5	28 600	20 400	8000
406	30	90	23	2,5	36 500	26 800	6300
407	35	100	25	2,5	43 000	31 300	6300
408	40	110	27	3	49 500	36 400	5000
409	45	120	29	3	59 300	45 500	5000
410	50	130	31	3,5	67 200	52 000	4000
411	55	140	33	3,5	77 300	62 500	4000
412	60	150	35	3,5	84 000	70 000	3150
413	65	160	37	3,5	91 000	78 000	3150
414	70	180	42	4	111 000	105 000	3150
415	75	190	45	4	117 000	115 000	3150
416	80	200	48	4	126 000	125 000	2500
417	85	210	52	5	134 000	136 000	2500

Таблица П5.2. **роликоподшипники радиальные с короткими цилиндрическими роликами (рис. 8.19)**

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
Легкая узкая серия							
2202, 32202, 42202	15	35	11	1	5520	3020	16 000
2204, 32204, 42204	20	47	14	1,5	11 700	7250	12 500
2205, 32205, 42205	25	52	15	1,5	13 200	8450	10 000
2206, 32206, 42206	30	62	16	1,5	17 000	11 200	10 000
2207, 32207, 42207	35	72	17	2	25 000	17 200	8000
2208, 32208, 42208	40	80	18	2	33 000	23 500	8000
2209, 32209, 42209	45	85	19	2	34 300	25 200	6300
2210, 32210, 42210	50	90	20	2	38 000	28 600	6300
2211, 32211, 42211	55	100	21	2,5	43 000	32 300	6300
2212, 32212, 42212	60	110	22	2,5	53 700	42 000	5000
2213,32213, 42213	65	120	23	2,5	61 000	47 600	5000
2214, 32214, 42214	70	125	24	2,5	67 500	47 700	4000
2215, 32215, 42215	75	130	25	2,5	76 500	60 000	4000
2216, 32216, 42216	80	140	26	3	78 000	62 300	4000
2217, 32217, 42217	85	150	28	3	97 000	80 900	3150
2218, 32218, 42218	90	160	30	3	119 000	99 000	3150
— , 32219, 42219	95	170	32	3,5	130 000	109 000	3150
2220, 32220, —	100	180	34	3,5	132 500	109 000	2500
— , 32221, 42221	105	190	36	3,5	160 000	137 000	2500
2222, 32222, —	110	200	38	3,5	185 000	159 000	2500
2224, 32224, 42224	120	215	40	3,5	209 000	185 000	2500
2226, 32226, 42226	130	230	40	4	217 000	195 000	2000
2228, 32228, 42228	140	250	42	4	254 000	232 000	2000
Средняя узкая серия							
2305, 32305, 42305	25	62	17	2	22 200	14 500	8000
2306, 32306, 42306	30	72	19	2	29 600	20 200	8000
2307, 32307, 42307	35	80	21	2,5	33 400	22 800	6300
2308, 32308, 42308	40	90	23	2,5	40 200	28 000	6300
2309, 32309, 42309	45	100	25	2,5	55 500	40 000	6300
2310, 32310, 42310	50	110	27	3	64 000	46 500	5000
2311, 32311, 42311	55	120	29	3	82 500	61 500	5000
2312, 32312, 42312	60	130	31	3,5	98 000	75 800	4000
2313, 32313, 42313	65	140	33	3,5	103 000	78 000	4000
2314, 32314, 42314	70	150	35	3,5	121 000	95 500	4000
2315, 32315, 42315	75	160	37	3,5	139 000	110 000	3150
2316, 32316, 42316	80	170	39	3,5	147 000	118 500	3150
2317, 32317, 42317	85	180	41	4	175 000	143 000	3150
2318, 32318, 42318	90	190	43	4	190 000	157 000	2500
2319, 32319, 42319	95	200	45	4	206 000	171 500	2500
2320, 32320, 42320	100	215	47	4	238 000	197 000	2500
2322, 32322, 42322	110	240	50	4	301 000	257 000	2000
2324, 32324, 42324	120	260	55	4	380 000	332 000	2000
2326, 32326, 42326	130	280	58	5	424 000	374 000	2000
2328, 32328, 42328	140	300	62	5	469 000	419 000	1600
2332, 32332, 42332	160	340	68	5	541 000	497 000	1600
2336, 32336, 42336	180	380	75	5	764 000	724 000	1250
2340, 32340, 42340	200	420	80	6	860 000	818 000	1250
Средняя широкая серия							
2605, 32605, 42605	25	62	24	2	36 700	27 800	8000
2606, 32606, 42606	30	72	27	2	40 900	30 600	8000
2607, 32607, 42607	35	80	31	2,5	45 800	34 200	6300
2608, 32608, 42608	40	90	33	2,5	59 900	46 600	6300
2609, 32609, 42609	45	100	36	2,5	77 700	61 500	6300
2610, 32610, 42610	50	110	40	3	102 000	85 500	5000
2611, 32611, 42611	55	120	43	3	113 000	92 500	5000
2612, 32612, 42612	60	130	46	3,5	137 000	116 000	4000
2613, 32613, 42613	65	140	48	3,5	149 000	126 000	4000
2615, 32615, 42615	75	160	55	3,5	208 000	183 000	3150

2616, 32616, 42616	80	170	58	3,5	220 000	198 000	3150
2617, 32617, 42617	85	180	60	4	254 000	230 000	3150
2618, 32618, 42618	90	190	64	4	265 000	240 000	2500
2620, 32620, 42620	100	215	73	4	356 000	336 000	2500
2622, 32622, 42622	110	240	80	4	364 000	450 000	2000
2624, 32624, 42624	120	260	86	4	548 000	535 000	2000
2626, 32626, 42626	130	280	93	5	650 000	650 000	2000
2630, 32630, 42630	150	320	108	5	753 000	757 000	1600
2634, 32634, 42634	170	360	120	5	1040 000	1080 000	1250
Тяжелая серия							
— , 32410, 42410	50	130	31	3,5	100 000	75 000	4000
2411, 32411, 42411	55	140	33	3,5	108 000	82 000	4000
2412, 32412, 42412	60	150	35	3,5	121 000	101 000	4000
2413, 32413, 42413	65	160	37	4	143 000	112 000	3150
2414, 32414,	70	180	42	4	183 000	147 000	3150
2415, 32415, 42415	75	190	45	4	212 000	173 000	3150
2416, 32416, —	80	200	48	5	244 000	200 000	2500
2417, 32417, 42417	85	210	52	5	266 000	221 000	2500
2418, 32418, 42418	90	225	54	5	300 000	252 000	2500
— , 32419, —	95	240	55	5	320 000	273 000	2500
2420, 32420, 42420	100	250	58	5	360 000	310 000	2000
2421, 32421, 42421	105	260	60	5	400 000	345 000	2000
2422, 32422, 42422	110	280	65	5	445 000	388 000	2000
2424, 32424, 42424	120	310	72	6	557 000	500 000	2000
— , 32426, 42426	130	340	78	6	670 000	605 000	1250
— , 32428, 42428	140	360	82	6	725 000	655 000	1250

Таблица П.5.3. **Подшипники шариковые радиальные однорядные с двумя уплотнениями**

Условное обозначение подшипника	d, мм	D, мм	B, мм	r, мм	C, Н	C_0, Н	n, об/мин
180500	10	30	14	1	4590	2670	8000
180501	12	32	14	1	4690	2670	8000
180502	15	35	14	1	5220	3030	6300
180503	17	40	16	1	7360	4410	6300
180504	20	47	18	1,5	8220	5000	5000
180505	25	52	18	1,5	10 800	6950	4000
180506	30	62	20	1,5	11 600	7740	4000
180508	40	80	23	2	23 200	17 750	3150
180509	45	85	23	2	24 100	17 850	3150
180602	15	42	17	1,5	8750	5410	8000
180603	17	47	19	1,5	10 700	6680	8000

Приложение 6. Шкала мощностей, высоты осей вращения и установочные размеры электрических машин

Таблица П6.1. **Шкала мощностей, кВт, по ГОСТ 12139—84 (в диапазоне от 0,06 до 1000 кВт)**

0,06	0,55	4	22	90	315
0,09	0,75	5,5	30	110	400
0,12	1,1	7,5	37	132	500
0,18	1,5	11	45	160	630
0,25	2,2	15	55	200	800
0,37	3	18,5	75	250	1000

Таблица П6.2. **Высоты оси вращения**

За высоту вращения принимается расстояние от оси вращения до опорной плоскости машины, измеренное в середине выступающего конца вала.

Номинальные значения высот оси вращения должно соответствовать ряду 40, 45, 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 250, 280, 315, 355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900 и 1000 мм.

Примечание. 1. В технически обоснованных случаях допускается применение высот оси вращения 125, 140 и 236 мм и для машин, разрабатываемых на базе существующих серий, также высоты оси вращения 600 мм.

2. Указанные значения высот оси вращения распространяются на все конструктивные формы вновь разрабатываемых и модернизируемых (в части установочных размеров) электрических машин общего назначения и специального назначения с горизонтальной осью вращения.

3. Отклонение от номинальной высоты оси вращения относительно опорной плоскости машины должно соответствовать ГОСТ для электрических машин и непосредственно соединяемых с ними неэлектрических машин, кроме неэлектрических двигателей.

Таблица П6.3. **Высоты оси вращения и связанные с ними установочные размеры, мм, электрических машин (см. рис. 11.2)**

h		b_{10}	Условное обозначение длины сердечника	l_{10}	l_{31}	d_{10}
Номинальное значение	Допуск					
Высоты оси вращения от 56 до 400 мм						
56	-0,5	90	—	71	36	5,8
63	-0,5	100	—	80	40	7
71	-0,5	112	—	90	45	7
80	-0,5	125	—	100	50	10
90	-0,5	140	S L	100 125	56	10

100	-0,5	160	S L	112 140	63	12
112	-0,5	190	S M L	114 140 159	70	12
132	-0,5	216	S M L	140 178 203	89	12
160	-0,5	254	S M L	178 210 254	108	15
180	-0,5	279	S M L	203 241 279	121	15
200	-0,5	318	S M L	228 267 305	133	19
225	-0,5	356	S M L	286 311 356	149	19
250	-0,5	404	S M L	311 349 406	168	24
280	-1	457	S M L	368 419 457	190	24
315	-1	508	S M L	406 457 508	216	28
355	-1	610	S M L	500 560 630	254	28
400	-1	686	S M L — —	560 630 710 800 900	280	35
Высоты оси вращения от 450 до 630 мм						
450	-1	710, 800, 900, 1000, 1120	—	355, 400, 450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1120, 1250	—	35
500	-1	800, 900, 1000, 1120, 1250	—	400, 450, 500, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400	—	42

560	-1	900, 1000, 1120, 1250, 1400	—	450, 500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400	—	42
630	-1	1000, 1120, 1250, 1400, 1600	—	500, 560, 630, 710, 800, 900, 1000, 1120, 1250, 1400, 1600	—	48

Примечание. Для двигателей с высотами оси вращения от 450 до 630 мм размеры l_{31} следует выбирать из ряда 100, 200, 224, 250, 280, 315, 335, 355, 375, 400, 425, 450, 475, 500, 530, 560, 600, 630, 670, 710, 750, 800, 900, 1000 мм независимо от высоты вращения.

Таблица П6.4. **Размеры выступающего конца вала электрических двигателей (см. рис. 11.2)**

d_1, мм	l_1, мм	Наибольший момент вращения, Н·м
7	16	0,25
9	20	0,63
11	23	1,25
14	30	2,8
16	40	4,5
18	40	7,1
19	40	8,25
22	50	14
24	50	18
28	60	31,5
32	80	50
38	80	90
42	110	125
48	110	200
55	110	355
60	140	450
65	140	630
70	140	800
75	140	1000
80	170	1250
85	170	1600
90	170	1900
95	170	2360
100	210	2800
110	210	4000
120	210	—
126	210	—
130	250	—
140	250	—
150	250	—
160	300	—
170	300	—
180	300	—
190	350	—
200	350	—
220	350	—

Таблица П6.5. **Размеры, мм, крепительных фланцев по данным публикации МЭК (см. рис. 11.2)**

Диаметры фланца			Отверстия для болтов		
d_{20}	d_{25}	d_{24}	Число отверстий n	Диаметр d_{22}, мм	
				гладкий	резьбовой
55	40	70	4	5,8	М5
65	50	80	4	5,8	М5
75	60	90	4	5,8	М5
85	70	105	4	7	М6
100	80	120	4	7	М6
115	95	140	4	10	М8
130	110	160	4	10	М8
165	130	200	4	12	М10
215	160	250	4	15	М12
265	230	300	4	16	М12
300	250	350	4	19	М16
350	300	400	4	19	М16
400	350	450	8	19	М16
500	450	550	8	19	М16
600	550	660	8	24	М20
740	680	800	8	24	М24
940	880	1000	8	28	М24
1080	1000	1150	8	28	М24

Приложение 7. **Условное обозначение исполнения электрических машин по степени защиты**

Условное обозначение степени защиты электрических изделий, обеспечиваемых их оболочками, состоит из двух букв латинского алфавита — IP (начальные буквы слов International Protection) и двух цифр.

Первая цифра (от 1 до 6) обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с находящимися под напряжением и вращающимися частями, расположенными внутри оболочки электротехнического изделия, а также от попадания внутрь оболочки твердых посторонних предметов (табл. П7.1).

Вторая цифра (от 1 до 8) обозначает степень защиты изделия от попадания воды внутрь его оболочки (см. табл. 1.3).

Электрические машины выпускаются со степенями защиты, обозначение которых приведено в табл. 1.4.

Если требуется указать степень защиты изделия только одной цифрой условного обозначения, то пропущенная цифра заменяется буквой «X», например, IPX4,IP3X.

Таблица П7.1. **Условное обозначение степени защиты электрических машин**

Первая цифра обозначения[1]	Вторая цифра обозначения[2]								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IP00	IP01	—	—	—	—	—	—	—
1	IP10	IP11	IP12	IP13	—	—	—	—	—
2	IP20	IP21	IP22	IP23	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	—	—	—	—	IP43	IP44	—	—	—
5	—	—	—	—	IP54	IP55	IP56	IP57	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Приложение 8. **Условное обозначение способов охлаждения электрических машин**

Условное обозначение способ охлаждения электрических машин содержит две буквы латинского алфавита — IC (начальные буквы слов International Cooling) и следующих за ними характеристики целей охлаждения. Каждая характеристика в свою очередь состоит из букв латинского алфавита и двух цифр.

Буквы обозначают вид хладагента, используемого в данной цепи: воздух — A, водород — H, азот — N, фреон — F, вода — W, диоксид углерода — C, масло — V, керосин — K. Если в качестве хладагента используется другие, не переименованные газы или жидкости, то в обозначении приводят их полное наименование.

В цифровой части обозначения первая цифра условно обозначает устройство для циркуляции хладагента (табл. П8.1); вторая — способ перемещения хладагента (табл. П8.2).

Если машина имеет две или более цепи охлаждения, как, например, обдуваемое двигателя исполнения IP44 или машины с замкнутой системой охлаждения при наличии охладителей, то в обозначении указывают характеристики каждой из цепи, начиная с цепи со вторичным, т. е. имеющим более низку температуру, хладагентом.

В целях упрощения обозначений допускается для наиболее распространенных систем воздушного охлаждения в условном обозначении опускать букву A; если способом перемещения хладагента является самовентиляция, то в обозначении допускается сохранять только первую цифру, характеризующую устройство цепи охлаждения, например обозначать IC0 вместо IC01, как при полном обозначении.

Примеры условных обозначений систем охлаждений систем охлаждения электрических машин приведены в табл. П8.3.

Таблица П8.1. **Условное обозначение цепи циркуляции хладагента (первая цифра в условном обозначении системы охлаждения)**

Цифра	Краткая характеристика цепи
0	Хладагент свободно подводится из окружающей среды к машине и свободно возвращается в эту среду — свободная циркуляция.
3	Хладагент подводится к машине или к охладителю не из окружающей среды, а из другого источника через подводящую трубу или подводящий канал, а затем удаляется через отводящую трубу или отводящий канал на некоторое расстояние от машины — охлаждение при помощи подводящей и отводящей труб или каналов.
4	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло через поверхность корпуса вторичному хладагенту, которым является среда, окружающая корпус машины. Поверхность корпуса машины может быть гладкой или ребристой для лучшей теплопередачи — охлаждение внешней поверхности машины.
7	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, встроенном в машину и являющемся ее неотъемлемой частью; вторичным хладагентом не является среда, окружающая машину — охлаждение при помощи встроенного охладителя, без использования окружающей среды.

8	Первичный хладагент циркулирует по замкнутой системе и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, являющемся независимым устройством, установленным непосредственно на машине; вторичным хладагентом не является среда, окружающая машину — охлаждение при помощи пристроенного охладителя без использования окружающей среды.

Примечание. В таблице приведены обозначения не всех цепей циркуляции хладагента, используемых для охлаждения электрических машин.

Таблица П8.2. **Условное обозначение способа перемещения хладагента (вторая цифра в условном обозначении системы охлаждения)**

Цифра	Способ перемещения хладагента
0	За счет разницы температур — свободная конвекция; вентилирующее действие ротора машины незначительно
1	Вентилирующим действием ротора или при помощи специального устройства, расположенного на валу ротора машины, — самовентиляция
2	При помощи зависимого встроенного устройства, не смонтированного непосредственно на валу машины, например, встроенного вентилятора с зубчатой передачей или ременным приводом
3	При помощи зависимого пристроенного устройства, установленного непосредственно к машине, например, вентилятора, приводимого в действие электрическим двигателем, получающим питание от выводов охлаждаемой машины
7	При помощи отдельного устройства, не установленного на машине и не зависящего от нее, или под давлением в системе циркуляции хладагента, например, путем подачи воды из водопроводной сети или газа под давлением при помощи форсунки
8	Посредством относительного движения машины через хладагент, например тяговый двигатель, охлаждаемый воздухом, или двигатель, приводящий в движение вентилятор и охлаждаемый основным воздушным потоком

Таблица П8.3. **Примеры условных обозначений систем охлаждения электрических машин**

Система охлаждения	Обозначение*
Защищенная машина с самовентиляцией; вентилятор расположен на валу машины	IC01
Защищенная машина, охлаждаемая пристроенным вентилятором; приводной электродвигатель вентилятора получает питание от выводов охлаждаемой машины	IC03
Закрытая машина с естественным охлаждением без внешнего вентилятора	IC0040
Закрытая машина с ребристой или гладкой станиной, обдуваемая внешним вентилятором, расположенным на валу машины	IC0141
Закрытая машина с подводящей и отводящей трубами; машина охлаждается вентилятором с приводным электродвигателем, не установленным на машине	IC37
Закрытая машина с воздушным охлаждением и пристроенным водяным охладителем; циркуляция воды в охладителе осуществляется отдельным насосом или водопроводной сети	ICW37A81
Закрытая машина, имеющая обмотку статора с непосредственным водяным охлаждением; обмотка ротора охлаждается водородом; циркуляция воды в обмотке статора осуществляется отдельным насосом или от водопроводной сети; к машине пристроен воздушный охладитель	IC87 обмотка статора (W87) ротор H71

* См. табл. П8.1 и П8.2.

Приложение 9. Технические данные двигателей серий 5А и АИР Владимирского электромоторного завода (ВЭМЗ)

Таблица П9.1. Технические данные двигателей основного исполнения
Степень защиты IP54, класс нагревостойкости *F*

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Н м	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Динамический момент инерции ротора, кг м²	Масса, кг
2p = 2, 3000 об/мин											
5A80MA2	1.5	2820	81	0,85	3,3	5,1	2,5	6,5	2,6	0,0018	14
5A80MB2	2.2	2830	81	0,85	4,8	7,4	2,5	6,5	2,6	0,0021	15,5
5A112M2	7.5	2885	87,5	0,89	14,6	25	2,9	7,5	3,3	0,0131	57
АИРМ132М2	11	2900	89	0,89	21,0	36	2,4	8,0	2,9	0,024	77,5
5A160S2	15	2930	90	0,89	28,4	49	2,7	7,5	3,4	0,039	126
5A160M2	18.5	2930	90.5	0,89	34,8	60	2,8	7,5	3,4	0,045	138
АИР180S2	22	2930	90,5	0,89	41,4	72	2,3	7,0	2,9	0,063	160
АИР180М2	30	2935	91	0,89	56.1	98	2,3	7,5	3,4	0,076	180
5A200M2	37	2940	93,5	0,89	67,4	120	2,3	7,2	2,8	0,13	235
5A200L2	45	2950	93,5	0,89	82,0	146	2,3	7,3	2,8	0,15	255
5A225M2	55	2950	93,5	0,91	97,9	178	2,3	7,5	2,8	0,21	340
5AM250S2	75	2955	93,2	0,92	133	242	1,8	6,9	2,9	0,47	475
5AM250M2	90	2955	93,1	0,93	157	291	1,7	7,2	2,7	0,52	505
5AM280S2	110	2960	94,1	0,92	193	355	2,1	7,2	3,4	0,85	720
5AM280M2	132	2960	94,5	0,92	230	426	2,3	7,5	3,4	1,02	770
5AM315S2	160	2970	94,5	0,92	279	514	1,8	7,2	2,8	1,42	970
5AM315M2	200	2975	95	0,94	339	642	1,8	7,2	2,8	1,78	1110
2p = 4, 1500 об/мин											
5A80MA4	1.1	1400	74	0,8	2,8	7,5	2	4,8	2,4	0,0034	13
5A80MB4	1.5	1405	76	0,81	3,7	10	2	5	2,4	0,0036	14.7
5A112M4	5.5	1430	86	0,83	11,7	37	2,7	6,7	2,9	0,020	56
АИРМ132S4	7.5	1450	88	0,85	15,2	49	2,1	7	2,8	0,032	70

Продолжение табл. П9.1

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Н м	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Динамический момент инерции ротора, кг · м^2	Масса, кг
АИРМ132М4	11	1450	89	0,85	22	72	2,4	7,2	3,1	0,045	83,5
5А160S4	15	1450	89,5	0,86	29,5	99	2,3	6,1	2,6	0,075	127
5А160М4	18,5	1450	90	0,86	36,2	122	2,3	6,4	2,6	0,087	140
АИР180S4	22	1460	90,5	0,86	42,8	144	1,7	6,9	2,6	0,16	170
АИР180М4	30	1460	91,5	0,87	57,1	196	1,7	6,7	2,6	0,20	190
5А200М4	37	1470	92,3	0,85	71,5	240	2,4	6,7	2,6	0,27	245
5А200L4	45	1470	92,7	0,84	87,6	292	2,8	7,2	2,8	0,32	270
5А225М4	55	1475	93,3	0,86	104	356	2,2	6,5	2,3	0,50	345
5АМ250S4	75	1480	94,3	0,86	140	484	2,1	7,2	2,3	1,00	480
5АМ250М4	90	1480	94,7	0,88	164	580	2,2	7,2	2,3	1,20	515
5АМ280S4	110	1485	95,4	0,88	199	707	2,3	6,8	2,8	2,19	780
5АМ280М4	132	1485	95,9	0,89	234	848	2,4	7	2,8	2,70	885
5АМ315S4	160	1485	96	0,88	287	1028	1,9	6,8	2,2	3,57	1110
5АМ315М4	200	1485	96	0,9	351	1285	1,8	6,6	2	3,97	1150
2p = 6, 1000 об/мин											
5А80МА6	0,75	930	71	0,69	2,3	7,7	2	4,5	2,4	0,0033	14
5А80МВ6	1,1	930	72	0,7	3,3	11,5	2	4,5	2,4	0,0048	16
5А112МА6	3	950	80,5	0,79	7,1	30	2,3	5,5	2,7	0,024	50
5А112МВ6	4	950	81,5	0,81	9,2	40	2,3	5,5	2,7	0,029	55
АИРМ132S6	5,5	960	84,5	0,81	12,5	55	2,1	5,5	2,5	0,048	68
АИРМ132М6	7,5	970	86	0,81	16,5	75	2,2	6	2,8	0,067	81
5А160S6	11	970	88,5	0,84	22,5	108	2	6,5	2,8	0,11	124
5А160М6	15	975	88,5	0,84	31	148	2	6,5	2,8	0,15	150
АИР180М6	18,5	975	90	0,85	37	182	2	6,5	2,7	0,24	180
5А200М6	22	975	90,5	0,83	44,5	215	2,3	5,9	2,3	0,41	245
5А200L6	30	980	91,2	0,84	59,5	294	2,4	5,8	2,4	0,46	260
5А225М6	37	985	92	0,84	72,5	360	2,4	6,5	2,5	0,65	330
5АМ250S6	45	985	93	0,85	86,5	436	2	6	2,1	1,20	430
5АМ250М6	55	985	93	0,84	107	533	2	6	2,1	1,30	450
5АМ280S6	75	985	94,7	0,85	141	727	2,2	6,3	2,4	3,04	745
5АМ280М6	90	985	94,7	0,84	171	872	2	6,3	2,2	3,05	780
5АМ315S6	110	985	95	0,9	195	1066	1,6	6,7	2,4	4,54	960
5АМ315М6	132	985	95,2	0,91	231	1279	1,7	7	2,4	5,13	1010

Продолжение табл. П9.1

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Н м	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Динамический момент инерции ротора, кг · м²	Масса, кг
2p = 8, 750 об/мин											
5A80MA8	0,37	700	59	0,62	1,5	5	2,2	3,3	2,2	0,0036	13,5
5A80MB8	0,55	700	60	0,62	2,2	7,5	2,2	3,8	2,4	0,0047	15,7
5A112MA8	2,2	710	78	0,66	6,5	30	2,3	4,5	2,5	0,024	50
5A112MB8	3	710	78,5	0,67	8,6	40	2,3	4,5	2,5	0,029	54
АИРМ132S	4	710	81,5	0,7	10,6	54	2,1	5	2,6	0,053	68
АИРМ132М8	5,5	710	83,5	0,73	13,7	74	2,1	5,3	2,6	0,074	82
5A160S8	7,5	720	87	0,74	17,7	99	1,8	5,3	2,4	0,11	123
5A160M8	11	720	87	0,74	25,9	146	1,8	5,3	2,4	0,15	149
АИР180М8	15	725	87,5	0,79	32,9	197	1,6	5,3	2,4	0,25	180
5A200M8	18,5	730	90,5	0,77	40,5	242	2,1	6,7	2,8	0,41	240
5A200L8	22	730	91	0,8	46	288	2,1	6,7	2,8	0,46	260
5A225M8	30	735	91,5	0,8	62	390	2,1	5,5	2,3	0,70	340
5AM250S8	37	735	92	0,72	85	480	1,9	6,7	2,7	1,20	430
5AM250M8	45	735	92,5	0,75	98	584	1,9	6,7	2,7	1,40	460
5AM280S8	55	735	94,5	0,83	106	714	2,1	6,2	2,3	3,29	725
5AM280M8	75	735	94,5	0,83	145	974	2,1	6	2,3	4,00	790
5AM315S8	90	740	94,5	0,85	170	1161	1,5	6	2,1	5,21	965
5AM315M8	110	740	94,5	0,86	205	1419	1,5	6	2,1	6,03	1025
2p = 10, 600 об/мин											
5AM280S10	37	590	93	0,78	77	600	1,5	6,5	3	3,41	710
5AM280M10	45	590	93,5	0,8	91	730	1,5	6,5	3	4,07	760
5AM315S10	55	590	93,5	0,86	109	890	1,6	5,5	2,1	5,97	925
5AM315M10	75	595	93,5	0,85	148	1213	1,9	6,0	2,1	6,78	975
2p = 12, 500 об/мин											
5AM315S12	45	490	93	0,8	98	876	1,8	5,2	2,1	5,97	925
5AM315M12	55	490	93	0,8	119	1071	1,7	5,2	2,1	6,78	975

Таблица П9.2. Технические данные двигателей с повышенным скольжением
Степень защиты IP54, класс нагревостойкости изоляции *F*

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Н·м	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Динамический момент инерции ротора, кг·м^2	Масса, кг
2p = 2, 3000 об/мин											
АИРС132М2	12,5	2800	86	0,89	24,7	44	2,6	6,5	3	0,024	77,5
2p = 4, 1500 об/мин											
АИРС132S4	8,5	1370	83	0,84	18,5	59	2,9	5,5	2,9	0,032	78
АИРС132М4	11,8	1400	86	0,82	25,4	80	3,5	6,5	3,5	0,045	83,5
5АС160М4	20	1400	86	0,87	40,5	136	2,4	5	2,6	0,087	140
АИРС180М4	22	1415	88,5	0,87	43,3	148	3,1	7	3,2	0,2	190
2p = 6, 1000 об/мин											
АИРС132S6	6,3	925	82	0,8	14,6	65	2,7	5,3	2,8	0,048	68
АИРС132М6	8,5	930	83	0,8	19,4	87	3	5,8	3,1	0,067	81
5АС160М6	16	930	84	0,85	34	164	2,2	5,5	2,5	0,15	150
АИРС180М6	18,5	920	83	0,84	40,2	192	3,3	6,1	3,3	0,24	180
2p = 8, 750 об/мин											
АИРС180М8	15	675	81	0,8	35,1	212	2,8	5,5	2,8	0,25	180
5АС225М8	26,5	700	86	0,8	58,3	361	2,9	5,5	3	0,70	340

Таблица П9.3. Технические данные многоскоростных двигателей
Степень защиты IP54, класс нагревостойкости *F*

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Н · м	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Динамический момент инерции ротора, кг · м²	Масса, кг
Двухскоростные двигатели											
2p = 4/2, 1500/3000 об/мин											
АИР132S4/2	6 7,1	1450 2900	86,5 81	0,85 0,85	12,4 15,6	40 24	2 2,3	7 7	2,7 2,8	0,032	70
АИР132М4/2	8,5 9,5	1450 2910	88 85	0,85 0,85	17,2 19,9	56 31	2,3 2,7	7 8	2,7 3,2	0,045	83,5
АИР180S4/2	18,5 21	1460 2920	98,5 86	0,86 0,9	36,4 41,1	120 69	1,5 1,5	6,5 6,5	2,5 2,5	0,16	170
АИР180М4/2	22 27	1460 2920	90,5 88	0,87 0,92	42,3 50,5	144 88	1,6 1,6	6,5 6,5	2,6 2,6	0,20	190
5А200М4/2	27 35	1475 2945	91,5 90	0,84 0,91	53,2 64,8	175 113	2,1 1,7	7,4 7,2	2,7 2,5	0,27	245
5А200L4/2	30 38,5	1470 2950	92 91,5	0,86 0,93	58 68	214 123	2,1 1,7	7 7	2,4 2,4	0,32	270
5А225М4/2	42 48	1480 2960	90 91,5	0,84 0,91	84 87	273 155	2 1,7	7 7,5	2,3 2,5	0,5	345
5АМ250S4/2	55 60	1480 2970	94 89	0,85 0,88	104 116	355 193	2,1 1,8	6,9 7,5	2,2 2,8	1,0	480
5АМ250М4/2	63 80	1470 2970	94 91	0,86 0,9	118 148	409 257	2,1 1,6	6,7 6,7	2,2 2,4	1,2	515
5АМ280S4/2	75 90	1470 2970	94 93	0,88 0,89	137 165	487 289	2 1,7	6,5 7	2,5 2,5	2,7	885
2p = 6/4, 1000/1500 об/мин											
АИР132S6/4	5 5,5	965 1430	83 83	0,78 0,9	11,7 11,2	50 37	1,6 1,6	5,5 5,5	2,5 2,2	0,048	68
АИР132М6/4	6,7 7,5	970 1440	85 86	0,75 0,9	15,9 14,7	66 50	2,1 1,8	6,5 6,2	2,9 2,5	0,067	81
АИР180М6/4	15 17	975 1450	86,5 87	0,77 0,9	34,1 32,9	147 112	2,4 1,8	7 6,3	3,2 2,5	0,24	180
5А200М6/4	20 22	980 1460	88,5 88	0,78 0,9	44 42,5	195 144	2,2 1,9	6,5 6	2,4 2	0,41	245
5А200L6/4	24 27	980 1460	88 88.5	0,75 0,9	55 52	234 176	2,7 2,2	6,9 5,5	2,7 2	0,46	260

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Н м	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Динамический момент инерции ротора, кг м²	Масса, кг
2p = 12/6, 500/1000 об/мин											
АИР180М12/6	7 13	485 975	79 86,5	0,6 0,87	22,3 26,2	138 127	1,5 1,3	4,3 5,8	2,2 2,2	0,24	180
5А200М12/6	9 14	475 980	83 90	0,6 0,88	27,4 26,8	181 131	1,9 1,9	4 6,3	1,9 2,3	0,41	245
5А200L12/6	10 17	475 980	83,5 90	0,6 0,88	29,2 32,5	200 166	1,8 1,7	3,9 6	1,8 2,1	0,46	260
5А225М12/6	14 25	485 980	83,5 90	0,58 0,87	44 48,4	281 243	1,8 1,6	4 6	1,9 2	0,65	330
5АМ250S12/6	16 30	490 985	86 91,5	0,52 0,85	54,2 58,5	312 291	2,1 1,6	4,3 6	1,9 1,9	1,2	430
5АМ250М12/6	18,5 36	490 985	84 90,5	0,53 0,86	63 70	360 349	2,1 1,7	4,2 5,8	1,9 1,9	1,3	450
2p = 8/4, 750/1500 об/мин											
АИР132S8/4	3,6 5,3	715 1430	78 80	0,74 0,91	7,8 11	48 35	1,8 1,7	4,8 5,9	2,3 2,3	0,053	68
АИР132М8/4	5 7,5	715 1430	80 83	0,71 0,88	13,3 15,6	67 50	2 1,9	5,1 6,1	2,5 2,5	0,074	82
АИР180М8/4	13 18,5	725 1450	84 87	0,72 0,9	32,6 35,8	171 122	1,8 1,5	5,8 6,5	2,6 2,5	0,25	180
5А200М8/4	15 22	730 1640	86 89	0,66 0,89	40 42	196 144	2,1 1,8	5,3 6,4	2,2 2,2	0,41	240
5А200L8/4	17 24	730 1460	86 89	0,77 0,91	39 45	222 157	1,8 1,7	5 5,5	1,8 1,9	0,46	260
5А225М8/4	23 34	735 1470	89 90,5	0,71 0,91	55,9 63	299 221	2 1,5	5,5 6,5	2,2 2,2	0,70	340
5АМ250S8/4	33 47	740 1480	90 90	0,76 0,9	73,1 87,9	459 303	1,8 1,6	5,4 6,3	2 2,2	1,2	430
5АМ250М8/4	37 55	740 1480	91 91	0,75 0,9	82,1 102	477 355	2 1,8	5,5 6,5	2 2,2	1,4	460
5АМ280М8/4	50 75	740 1480	92 93,5	0,75 0,9	110 135	645 580	2 2	5,5 6,6	2,2 2,5	4,0	790

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Н · м	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Динамический момент инерции ротора, кг · м²	Масса, кг
2p = 8/6, 750/1000 об/мин											
АИР132S8/6	3,2 4	720 960	80 81,5	0,71 0,81	8,5 9,2	44 40	1,8 1,4	4,5 5	2,5 2,3	0,053	68
АИР132М8/6	4,5 5,5	720 960	82,5 84	0,71 0,81	11,6 12,2	60 55	2 1,8	5,5 6	2,7 2,5	0,074	81
АИР180М8/6	13 15	730 980	85 88	0,76 0,84	30,5 30,7	170 146	1,4 1,7	5,5 6,5	2,2 2,6	0,25	180
5А200М8/6	15 18,5	735 975	89,5 90	0,72 0,84	35 37	195 185	2,2 2	5,5 6	2,2 2	0,41	240
5А200L8/6	18,5 23	735 980	89,5 90	0,72 0,84	43,5 46	240 224	2,2 2	5,5 6	2,3 2,1	0,46	260
5А225М8/6	22 30	735 980	91 91,5	0,71 0,85	52 58,5	286 292	2,4 2	6 6	2,5 2,1	0,70	340
5АМ250S8/6	30 37	735 985	91,5 90,5	0,72 0,84	69 73,7	390 358	2,3 2	6 6,5	2,3 2,1	1,2	430
5АМ250М8/6	45 55	735 985	92 92	0,76 0,85	97,5 107	584 533	1,6 1,8	5,3 6,2	1,7 2	1,4	460
Трехскоростные двигатели											
2p = 6/4/2, 1000/1500/3000 об/мин											
АИР132S6/4/2	2,8 4 4,5	955 1440 2895	78,5 83 79	0,75 0,85 0,9	7,2 8,6 9,6	28 26 15	1,8 1,7 2,2	5 6 6,3	2,4 2,5 2,8	0,053	68
АИР132М6/4/2	3,8 5,3 6,3	955 1440 2895	81,5 85 82	0,73 0,85 0,9	9,7 11,1 12,9	38 35 21	1,7 1,7 1,9	5,5 6,5 7	2,5 2,6 2,9	0,074	82
2p = 8/4/2, 750/1500/3000 об/мин											
АИР132S8/4/2	1,8 3,4 4	710 1440 2895	72 82 78	0,62 0,84 0,91	6,1 7,5 8,5	24 22 13	1,6 1,7 1,9	4 6 6,5	2,3 2,5 2,7	0,053	68
АИР132М8/4/2	2,4 4,5 5,6	710 1440 2895	76 83,5 81	0,61 0,85 0,92	7,8 9,6 11,4	32 30 18	1,6 1,5 1,6	4,5 6,3 6,7	2,4 2,6 2,6	0,074	82

Продолжение табл. П9.3

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Н м	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Динамический момент инерции ротора, кг м²	Масса, кг
2р = 8/6/4, 750/1000/1500 об/мин											
АИР132S8/6/4	1,9 2,4 3,4	715 955 1415	70 75 78	0,65 0,81 0,91	6,3 6 7,3	25 24 23	1,8 1,7 1,4	4,5 4,5 4,7	2,5 2,3 2	0,053	68
АИР132М8/6/4	2,8 3 5	715 960 1425	73 77 80	0,65 0,8 0,91	8,9 7,4 10,4	37 30 33	1,8 1,7 1,4	4,7 5 5,1	2,6 2,5 2,1	0,074	82
АИР180М8/6/4	8 11 12,5	730 975 1460	80 85 81	0,7 0,85 0,88	21,6 23,1 26,6	105 108 82	1,4 1,5 1,3	5,1 6,1 6,4	2,5 2,5 2,5	0.25	180
Четырехскоростные двигатели											
2р = 12/8/6/4, 500/750/1000/1500 об/мин											
АИР180М12/8/6/4	3 5,5 6 8	485 725 965 1460	62 79 81 82	0,58 0,72 0,89 0,9	12,6 14,7 12,6 16,4	59 72 59 52	1,8 1,3 1,2 1,1	4,1 4,7 5 6	2,5 2,2 2 2,1	0.25	180

Таблица П9.4. Технические данные взрывозащищенных двигателей серии ВА
Частота сети — 50 Гц, степень защиты IP54, класс нагревостойкости изоляции *F*

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Коэффициент полезного действия, %	Коэффициент мощности	Номинальный ток при 380 В, А	Номинальный момент, Н м	Отношение пускового момента к номинальному моменту	Отношение пускового тока к номинальному току	Отношение максимального момента к номинальному моменту	Динамический момент инерции ротора, кг · м²	Масса, кг	Средний уровень звукового давления, дБ
2p = 2, 3000 об/мин												
ВА80МА2	1,5	2850	81,5	0,85	3,3	5,0	2,4	6,5	2,6	0,0018	40	62
ВА80МВ2	2,2	2850	82	0,86	4,7	7,4	2,5	6,5	2,6	0,0021	42	62
ВА132М2	11	2810	88	0,90	21,0	36	1,8	7,5	2,8	0,024	100	74
ВА200М2	37	2940	93,0	0,89	68,0	120	2,4	7,0	2,8	0,13	305	82
ВА200L2	45	2950	93,0	0,89	82,0	146	2,4	7,0	2,8	0,15	325	82
2p = 4, 1500 об/мин												
ВА80МА4	1,1	1420	74	0,8	2,8	7,4	2,1	5	2,4	0,0034	40	55
ВА80МВ4	1,5	1410	75	0,81	3,7	10	2,1	5	2,4	0,0036	42	55
ВА132S4	7,5	1440	87,5	0,86	15	50	2,1	7	2,6	0,032	92	69
ВА132М4	11	1450	88,5	0,85	22	72	2,3	7,5	3,2	0,045	107	69
ВА200М4	37	1460	92,0	0,85	72	242	2,5	6,5	2,6	0,27	305	71
ВА200L4	45	1460	92,0	0,85	87	294	2,5	6,8	2,6	0,32	330	71
2p = 6, 1000 об/мин												
ВА80МА6	0,75	930	71	0,7	2,3	7,7	2	4,5	2,2	0,0033	40	51
ВА80МВ6	1,1	930	71	0,71	3,3	11	2	4,1	2,2	0,0048	42	51
ВА132S6	5,5	960	85	0,8	12	55	2	6,5	2,4	0,048	91	60
ВА132М6	7,5	960	85,5	0,81	16	75	2,2	6,5	2,5	0,067	105	60
ВА200М6	22	975	90	0,84	44	215	2,2	6	2,2	0,41	295	61
ВА200L6	30	975	90	0,84	60	294	2,2	6	2,2	0,46	320	61
2p = 8, 750 об/мин												
ВА132S8	4	720	83,0	0,7	10	53	1,9	5	2,3	0,053	90	58
ВА132М8	5,5	715	83,0	0,74	14	73	1,9	5,5	2,4	0,074	105	58
ВА200М8	18,5	735	90,5	0,76	42	240	2	6,4	2,6	0,41	295	61
ВА200L8	22	730	91	0,78	49	288	2	6	2,5	0,46	320	61

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александров К.К., Кузьмина Е.Г.* Электротехнические чертежи и схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.

2. *Антонов М.В.* Технология производства электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1993. 592 с.

3. *Гольдберг О.Д.* Испытания электрических машин. М.: Высшая школа, 2000. – 255 с.

4. *Гольдберг О.Д. Гурин Я.С., Свириденко И.С.* Проектирование электрических машин / Под ред. О.Д. Гольдберга. 2-е ., перераб и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 430 с.

5. *История* электротехники / Под ред. И.А. Глебова. М.: Издательство МЭИ, 1999. 524 с.

6. *Копылов И.П.* Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2004. – 607 с.

7. *Копылов И.П.* Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высшая школа, 2003. 386 с.

8. *Котеленец Н.Ф., Акимова Н.А., Антонов М.В.* Испытание эксплуатация и ремонт электрических машин / Под ред. *Котеленца Н.Ф.*. – М.: Изд-во Мастерство, 2003. – 386 с.

9. *Курбатов А.С., Седов В.И., Сорин Л.Н.* Проектирование тяговых электродвигателей / Под ред. А.С. Курбатова. – М.: Транспорт, 1987. – 536 с.

10. *Лопухина Е.М., Семенчуков Г.А.* Автоматическое проектирование электрических машин малой мощности. – М.: Высшая школа, 2002. 511 с.

11. *Орлов И.Н., Маслов С.И.* Системы автоматизированного проектирования электромеханических устройств. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 296 с.

12. *Пешков И. Б.* Обмоточные провода. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.

13. *Попов В.И., Ахунов Т.А., Макаров Л.Н.* Современные асинхронные машины: Новая Российская серия РА. – М.: Издательство «Знак», 1999. – 256 с.

14. *Приводы* и их элементы. Рынок продукции: Каталог-справочник. А.Б. Чистяков, Б.М. Парфенов, В.К. Свешников и др. / Под ред. А.Б. Чистякова. М.: Машиностроение, 1995. 432 с.

15. *Проектирование электрических машин.* Учеб. для вузов. И.П. Копылова, Б.К.Клоков и др. / Под ред. И.П. Копылова. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая шк., 2002. – 757 с.

16. *Справочник* по электрическим машинам: В 2 т. / Под общей ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1988, 1989. 1 т. 456 с.; 2 т. 688 с.

17. *Филиппов И.Ф.* Теплообмен в электрических машинах. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.

18. *Электротехнический* справочник: В 4 т. Т. 2 Электротехнические изделия и устройства / Под общ. Ред. Профессора МЭИ В.Г. Герасимова и др. М.: Издательство МЭИ, 1998. 518 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Н

О

П

Р

С

Т

У

Ф

Х

Ч

Ш

Щ

Э

ОГЛАВЛЕНИЕ